华章教育

PEARSON

国外电子与电气工程技术丛书

交直流电路基础

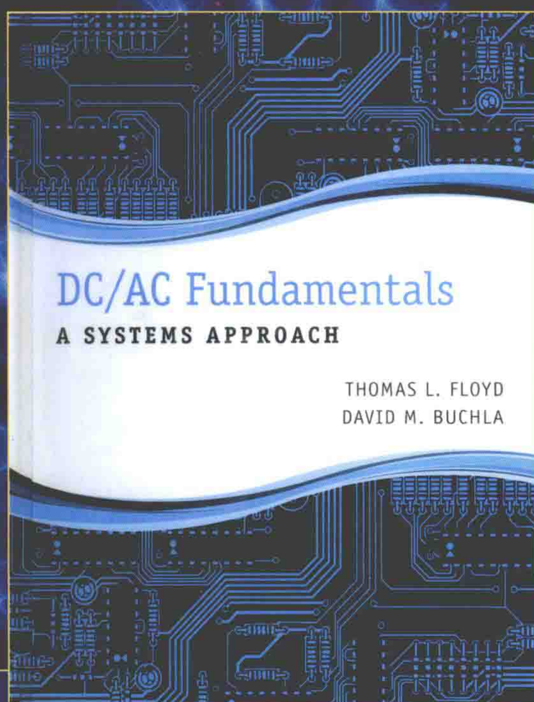
系统方法

[美] Thomas L. Floyd David M. Buchla 著

殷瑞祥 殷粤捷 译

DC/AC Fundamentals

A Systems Approach



机械工业出版社

China Machine Press

本书以系统方法阐述电路基本理论，每章都包括基本系统实例和系统注释，以加强学生对系统模块、接口关系、输入/输出信号的理解，掌握在实际系统中交直流电路的应用。主要内容包括直流电路、电磁现象与直流电机、交流电路、电容及*RC*交流电路、电感器及*RL*交流电路、*RLC*电路及谐振、变压器，以及含电抗电路的时间响应。本书还包括电路故障排除，强调系统故障诊断中必要的测试和测量。本书适合作为高等院校电路课程的基础教材，也可供职业学校的学生学习使用，还可作为工程技术人员的电路基础参考书。

本书特色

- 贯穿系统方法　通过特定的系统实例介绍基本直流、交流电路定律。各章均安排了与其目标相配套的系统实例和系统说明。系统注释给出了一些有趣的现象和系统问题相关的信息。
- 强调物理概念　很少列写长篇的数学公式及数学的推演，取而代之的是，以浅显的概念叙述介绍电路的工作过程，降低学习者的准入门槛，也更加突出电路中的物理概念。
- 结合工程应用　详解基本元器件的物理构造、实际标准，丰富的实际应用实例不仅会提高学生学习电路基础理论的兴趣，还有助于培养学生工程实际应用的能力。
- 涵盖故障排除　阐明电路故障排除的一般方法，使用Multisim对选定的例子、图例和问题进行电路与系统的仿真练习及故障排除，使得教材更实用，密切联系了实践应用。

作者简介

Thomas L. Floyd 于1964获得佛罗里达大学电气工程学士学位，于1968获得南卫理公会大学电气工程硕士学位。他曾在奥兰多的马丁玛丽埃塔公司从事导弹制导系统和数字通信系统的研发，期间在瓦伦西亚社区学院兼职教授电子技术课程。1973年，他任马丁玛丽埃塔公司的VCC新电子科技计划项目的主任，负责开发课程、设计实验室及授课。1977年他撰写了第一本世界优秀畅销书《Digital Fundamentals》（现已更新至第10版），同年他加入了北卡罗莱纳州云杉松美林社区学院，在这段时间，他的第二本畅销书《Electronics Fundamentals: Circuits, Devices & Applications》（现已更新至第8版）出版，此后又出版了《Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits》（现已更新至第6版）和《Electric Circuits Fundamentals》（现已更新至第8版）。近年，Floyd出版了包括这本教材在内的三本世界著名教材：《DC/AC Fundamentals: A Systems Approach》、《Digital Fundamentals: A Systems Approach》、《Analog Fundamentals: A Systems Approach》。

PEARSON
www.pearson.com

投稿热线：(010) 88379604
客服热线：(010) 88378991　88361066
购书热线：(010) 68326294　88379649　68995259



华章网站：www.hzbook.com
网上购书：www.china-pub.com
数字阅读：www.hzmedia.com.cn



上架指导：电路理论与分析



定价：99.00元

封面设计　江诗贤

国外电子与

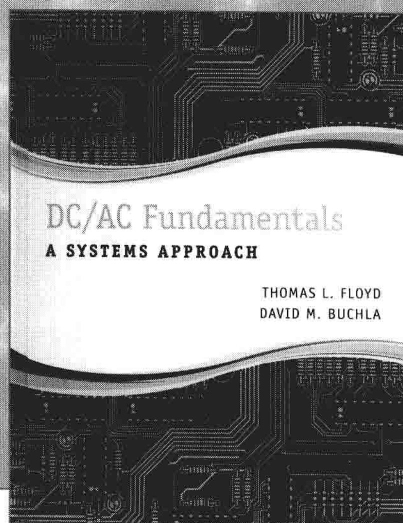
交直流电路基础

系统方法

[美] Thomas L. Floyd　David M. Buchla　著
殷瑞祥　殷粤捷　译

DC/AC Fundamentals

A Systems Approach




机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目（CIP）数据

交直流电路基础：系统方法/（美）弗洛伊德（Floyd，T. L.），（美）布奇勒（Buchla，D. M.）著；殷瑞祥，殷粤捷译．—北京：机械工业出版社，2014.2

（国外电子与电气工程技术丛书）

书名原文：DC/AC Fundamentals：A Systems Approach

ISBN 978-7-111-45360-4

Ⅰ.交…　Ⅱ.①弗…　②布…　③殷…　④殷…　Ⅲ.①交流电路　②直流电路　Ⅳ.TM131

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 321099 号

本书版权登记号：图字：01-2012-7774

全书共有 15 章，涵盖了交直流电路的主要基础知识。第 1、2 章介绍与电路有关的基本概念，第 3～6 章介绍直流电路，第 7 章介绍电磁现象与直流电动机，第 8 章介绍交流电路的相关基本概念，第 9、10 章介绍电容器及 *RC* 交流电路，第 11、12 章介绍电感器及 *RL* 交流电路，第 13 章介绍 *RLC* 电路及谐振，第 14 章介绍变压器，第 15 章介绍有抗电路的时间响应。书末有四个附录，附录 A 为标准电阻值表，附录 B 为电容器颜色编码与标记，附录 C 为诺顿定理与弥尔曼定理，附录 D 为电路仿真工具 NI Multisim。

机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号　邮政编码　100037）

责任编辑：谢晓芳

藁城市京瑞印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

185mm×260mm·34 印张

标准书号：ISBN 978-7-111-45360-4

定　　价：99.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

客服热线：(010) 88378991　88361066　　投稿热线：(010) 88379604

购书热线：(010) 68326294　88379649　68995259　　读者信箱：hzjsj@hzbook.com

出版者的话

文艺复兴以降，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Mark I. Montrose、David A. Johns 、Peter Wilson 、H. Vincent Poor、Dikshitulu K. Kalluri 、Bhag Singh Guru、Stephane Mallat等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也被越来越多实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方法如下：

华章网站： www.hzbook.com

电子邮件： hzjsj@hzbook.com

联系电话： (010) 88379604

联系地址： 北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码： 100037



华章科技图书出版中心

译 者 序

电路基础是所有电子电气工程相关专业大学生必须具备的最基本的学科基础，也是这些专业的大学生进入该学科的第一门课程，更是后续各门课程的先修条件，因此，它在大学生的修业过程中具有非常重要的地位。

第一次看到由 Thomas L. Floyd 和 David M. Buchla 编著的《DC/AC Fundamentals：A Systems Approach》，我们感到很兴奋，这本电路基础教材从根本上改变了电路课程教学的思维方式。我国高等学校电子电气类专业的电路课程都是用数学的手段来处理电路的现象，大都从电路的基本定律出发，建立电路的数学模型（方程组），然后通过数学方法获得电路的解，这就造成了学生在学习过程中被数学所困扰，进而失去学习电路课程的信心。但是，在我们见到的这本教材中，却很少看到数学的推演，也很少列写长篇的数学公式，取而代之的是以浅显的概念叙述介绍电路的工作过程，降低了学习者的准入门槛，也更加突出了电路中的物理概念。

本书的另一个特色是强调工程应用性。书中不仅对基本元器件（本书中的元器件符号与国标有差异）的物理构造、实际标准进行详细介绍，而且在介绍电路基础时引导学习者了解与之相关的系统应用，避免了电路基础的理论枯燥。书中还介绍了电路故障排除的一般方法，并在大部分章有针对地编排了一节电路故障排除，使得教材更实用，克服了多数电路教材理论与实践脱节的缺陷。

全书共有 15 章，涵盖了交直流电路的主要基础知识。第 1、2 章介绍与电路有关的基本概念，第 3～6 章介绍直流电路，第 7 章介绍电磁现象与直流电动机，第 8 章介绍与交流电路相关的基本概念，第 9、10 章介绍电容器及 *RC* 交流电路，第 11、12 章介绍电感器及 *RL* 交流电路，第 13 章介绍 *RLC* 电路及谐振，第 14 章介绍变压器，第 15 章介绍有抗电路的时间响应。本书末尾有四个附录：附录 A 为标准电阻值表，附录 B 为电容器颜色编码与标记，附录 C 为诺顿定理与弥尔曼定理，附录 D 为电路仿真工具 NI Multisim。

这本教材在定义电流时与一般教科书有所不同，本书采用电子的流向作为电流方向，而一般教科书则是采用正电荷的流向定义电流方向，读者在阅读本书时须注意。

这本电路基础教材，适合于所有希望学习电路基础的各专业大学生，也可供职业学校的学生学习电路基础使用，还可作为工程技术人员的电路基础参考书。

由于时间仓促且译者水平所限，译文中难免出现错漏，敬请广大读者批评指正。

殷瑞祥

前　言

本书第 1 版以比大多数标准书籍更广阔的视野来阐述交直流电路，本教材在阐述相关基本理论的基础上，强调在实际系统中交直流电路的应用。随着电子产品的发展，仅仅元件层次的电路故障排除需求已经减弱，而需要增加对系统模块、接口关系、输入/输出信号之间关系的了解。为了适应这一变化，书中每章都包括了一些基本系统实例和系统注释，这些系统实例和注释都是根据相应章节出现的元件和电路概念来选择，大多数章还包括一节故障排除，强调系统故障诊断中必要的测试和测量。

本书的数学基础是基本代数和直角坐标系的正弦、余弦、正切函数，不涉及复数代数运算，基本相量以图形方式表示，这样处理的原因是突出电路中相位差的重要性，而不局限于复杂的数学演算。

本书特点

- 通过特定的系统实例介绍基本直流、交流电路定律。
- 各章均安排了与其目标相配套的系统举例和系统注释。
- 详细介绍了示波器和数字万用表的原理、使用方法与技巧。
- 使用 Multisim 仿真对选定的例子、图例和问题进行电路与系统的仿真练习及故障排除。
- 通过实例说明基本概念，每一个实例提供了相关问题进行附加练习，许多例子还包括 Multisim 仿真的练习。
- 系统注释给出了一些有趣的现象和与系统问题相关的信息。
- 许多章包含一节故障排除，涉及本章涵盖的主题，并强调故障排除技术和仪器仪表的使用。
- 通过小贴士提供一些实用的信息。
- 每一章开始都设有“本章目标”。
- 每章各节都以这一节的引言和目标开始。
- 每一节都包含本节测试题，强化本节的主要概念。
- 每章末包括：本章小结、关键术语、公式列表、是非测验题、自测题、故障排除测验和精选的习题。
- 每章末尾提供了各节测试题、例题中相关问题、是非测验题、自测题、故障排除测验的答案。
- 书末的词汇表给出了正文中的全部黑体术语。
- 书末给出了所有奇数编号习题的答案。

教材特点介绍

章头（Chapter Opener）　每章开头都有本章目标和引言。

例题、相关问题、Multisim 仿真练习（Worked Example，Related Problem，Multisim Exercise）　每章都有大量例题，并且例题后有相关问题作补充练习，同时还有 Multisim 仿真练习供学生进行仿真检验。

节头（Section Opener） 各章的每一节开始包括总体概述和本节目标介绍。

本节测试（Section Checkup） 每一节的末尾设置了本节测试题供学生检验所学内容，并且本节测试题的答案位于章末。

系统举例（System Example） 许多系统举例说明了基本概念如何应用到系统中。

系统注释（System Note） 系统注释用来进一步强化内容并增加一些深入的与系统相关的信息。

故障排除节（Troubleshooting Section） 本书大部分章专门有一节故障排除内容，分析可能产生的故障、故障产生的原因以及如何避免发生故障。

小贴士（Hand On Tip） 小贴士提供了与文中相应位置有关的一些实用的信息。

安全提示（Safety Note） 安全提示提醒在进行相关操作时应注意的事项，避免发生用电危险。

致学生

任何职业培训都需要努力，电子、电气领域也不例外。学习新材料的最佳途径是阅读、思考和动手。本书旨在帮助你沿此道路前进，并说明基本定律如何在现实世界中得到应用。

仔细阅读每一节的文字，思考你所读的内容，有时，可能需要多次阅读一些内容。一步一步地理解每个例题的求解过程，然后再尝试解答例题后面的相关问题。阅读系统实例和系统注释，了解所学内容与现实情况的关联。学完一节后，回答安排在节末的本节测试题。例题的相关问题和本节测试题答案附在每章的结尾。

复习本章小结、关键术语的定义、公式列表；完成是非测验题、多项选择的自测题和故障排除测验；对照章末的答案检查自己的解答；最后完成习题，对照附在书末的奇数编号习题答案核对你的答案。

掌握本书所介绍的交直流电路基本定律和概念的重要性怎么强调也不过分，当你处理复杂电路和系统时将证明这些内容是非常宝贵的。大多数单位更愿意雇用一个基础知识扎实、全面并且有能力和热情接受新概念、新技术的人，如果你在基础知识方面受过良好的培训，单位将根据分配给你的具体工作而对你进行培训。

电子学职业

电力和电子领域是非常多元化的，可在许多领域获得职业发展机会，有许多类型的电力和电子技术资格认证培训。当今的许多行业（如生物技术和医疗领域）需要电力与电子技术技能。近来对可再生能源系统的广泛重视提升了对电气、电子技术的需求，电气、电子技术在可再生能源系统的开发、制造、安装和系统维护等方面得到广泛应用。机电技术是一个新的领域，是机械和电子技术员的协同组合。机电技术员负责机器人装配及其他需要机械和电子技能的系统，其他需要电气电子技术技能的工作有质量控制、客户服务或培训、技术作家和技术销售。

电子学的里程碑

让我们简要地回顾电子技术的重要发展，电气和电磁领域许多早期先驱者的名字被用于熟悉的单位和物理量，如欧姆、安培、伏特、法拉、亨利、库仑、奥斯特和赫兹的名字是一些较著名的例子。更广为人知的名字如富兰克林和爱迪生在电气电子历史上也很著名，他们对电气和电子技术做出了巨大的贡献。

电子学的起源

早期电子学实验涉及真空管的电流，海因里希·盖斯勒（Heinrich Geissler，1814—1879）发现，抽去玻璃管中的大部分空气，当电流通过时玻璃管会发光。后来，威廉·克鲁克斯爵士（Sir William Crookes，1832—1919）发现真空管中的电流似乎包含粒子。托马斯·爱迪生（Thomas Edison，1847—1931）用碳丝灯泡和极板做实验，发现有一个从热灯丝到带正电荷极板的电流，他将这个想法申请了专利但却从未使用过。其他早期实验者致力于测量真空管中粒子流的属性，约瑟夫·汤普森爵士（Sir Joseph Thompson，1856—1940）测得了这些粒子的性质，后来被称为电子。

虽然无线电通信的历史可以追溯到1844年，但是电子学一般认为是20世纪的概念，开始于真空管放大器的发明。1904年，约翰·弗莱明（John A. Fleming）构建了一种早期的真空管，其中电流单向流动，称为弗莱明管，它是真空二极管的前身。1907年，李·德福雷斯特（Lee deForest）在真空管中增加网格，他把这个新的器件称为真空三极管，可以放大弱信号。通过添加控制元件，李·德福雷斯特迎来了电子学革命。正是由于他的改进器件，使横贯大陆的电话服务和无线电广播成为可能。1912年，在加利福尼亚州的圣何塞市，一位业余无线电爱好者定时广播了音乐！

1921年，商务部长赫伯特·胡佛（Herbert Hoover）发放了第一张无线电广播电台许可证，两年内发放的许可证超过600个。到20世纪20年代末，收音机走进了许多家庭。埃德温·阿姆斯特朗（Edwin Armstrong）发明了一种新型的无线电收音机——超外差式收音机，解决了高频通信问题。1923年，美国研究人员弗拉基米尔·佐里金（Vladimir Zworykin）发明了第一台电视显像管，1927年，费罗·法恩斯沃斯（Philo T. Farnsworth）申请了一个完整的电视系统专利。

20世纪30年代，无线电得到全面发展，包括金属壳电子管、自动增益控制、“小型接收机”、定向天线等。这十年还开始了第一台电子计算机的研发，现代计算机起源可追溯到约翰·阿塔纳索夫（John Atanasoff）在爱荷华州立大学（Iowa State University）的工作。从1937年开始，他设想了一个二进制机器，可以做复杂的数学工作。到1939年，他和研究生克利福德·贝瑞（Clifford Berry）构建了一个称为ABC的二进制机器（阿塔纳索夫-贝瑞计算机），使用真空管进行逻辑运算，利用冷凝器（电容器）作存储。1939年，英国的亨利·布特（Henry Boot）和约翰·兰德尔（John Randall）发明了磁控管与微波振荡器。同年，美国的罗素（Russell）和西格尔德·瓦里安（Sigurd Varian）发明了微波速调管。

第二次世界大战期间，电子学发展迅速。磁控管和速调管使得雷达与甚高频通信成为可能，改进的阴极射线管被用于雷达，计算机的研制工作在战争期间继续。到1946年，约翰·冯·诺依曼（John von Neumann）在宾夕法尼亚大学开发了第一台存储程序计算机Eniac。电子学这十年的发展以晶体管的发明结束，它是有史以来最重要的发明之一。

固体电子学

早期无线电中使用的晶体检波器是现代固体器件的先驱，然而，固体电子学时代开始于1947年在贝尔实验室发明的晶体管，发明人是沃尔特·布拉顿（Walter Brattain）、约翰·巴丁（John Bardeen）和威廉·肖克利（William Shockley）。1947年引入了PCB（印制电路板），这一年发明了晶体管。1951年在宾夕法尼亚州的阿伦敦开始了晶体管的商业化生产。

20世纪50年代最重要的发明是集成电路。1958年9月12日，德州仪器（TI）的杰克·基尔比（Jack Kilby）制作了第一块集成电路（IC）。这一发明开创了现代计算机时代，彻底改变了医药、通信、制造业和娱乐行业，如今已经制造出了数以亿计的被称为“芯片”的集成电路。

20 世纪 60 年代开始的太空竞赛推动了小型化和计算机的发展，太空竞赛成为电子学快速发展的背后驱动力。仙童半导体公司（Fairchild Semiconductor）的鲍勃·维德拉（Bob Widlar）1965 年成功地设计了第一个“运算放大器”，称为 μA709，这是一个非常成功的发明，但是存在“闭锁”和其他一些问题。后来，有史以来最流行的运算放大器 741 在仙童公司实现，该运算放大器已经成为行业标准，并影响了未来多年的运算放大器设计。

1971 年，由仙童公司的一群人组建了一个新的公司并推出了第一款微处理器。这个公司就是英特尔，而这款微处理器产品就是 4004 芯片，它有着与 Eniac 计算机同样的处理能力。同年的稍后时间，英特尔公布了第一款 8 位处理器 8008，1975 年推出了第一台个人计算机阿尔泰（Altair），并被刊登在 1975 年 1 月发行的《大众科学》杂志封面上。20 世纪 70 年代还引入了袖珍计算器，光集成电路得到新发展。

到了 20 世纪 80 年代，有一半的美国家庭用有线电视取代了天线。整个 20 世纪 80 年代，电子产品在可靠性、速度和小型化方面不断发展，包括印制电路板的自动测试和校准。计算机成为仪器的一个部分并出现了虚拟仪器，计算机已成为工作台上的一个标准的工具。

20 世纪 90 年代互联网得到了广泛应用。1993 年只有 130 个网站，而现在有几百万个。各个公司争相建立主页，互联网与许多早期电台广播的发展有相似之处。1995 年，联邦电信交通委员会（FCC）为新的数字音频广播服务分配了频谱空间。1996 年，FCC 采用数字电视标准为美国下一代广播电视标准。

21 世纪的主要科技报道之一是互联网的持续爆炸性增长，无线宽带接入又推动了互联网的极速增长。计算机的处理速度正稳速增长，数据存储介质容量以越来越惊人的速度增加，碳纳米管被看做是计算机芯片的下一步发展，将最终取代晶体管技术。

21 世纪的第一个十年，通信网络主要是通过光纤获得最高的数据吞吐量。水下光纤电缆仍然是全球电视、电话和互联网通信的重要部分。计算机速度和功能的提高与新型蓝牙技术催生了各种设备之间的高速、短距离无线通信，如免提手机、计算机、GPS 接收器和其他无线网络装置。

在 21 世纪的第二个十年，电子技术将继续在令人惊奇的新设备和技术应用上取得进展，特别是在机器人装配和自动化方面。近年来，对替代能源的寻求已经促进了在电池、太阳能电池、燃料电池、风能以及汽车技术进步和效率方面的深入研发。医药方面的进展推动了假肢的发展，也许有一天，用生物相容性材料通过神经纤维生长加入触感和知觉，配戴者就能控制假肢。消费者不断要求最新的产品，制造商不断努力用最新技术的产品满足消费者的需求。在这个激动人心的领域可预见的未来将继续进展。

致谢

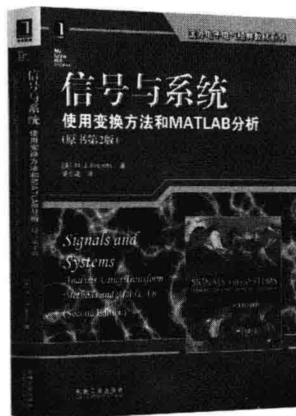
面向系统的系列教科书概念源于 ITT 学校高级教学人员和培生教育出版社（Pearson Education）韦恩·安东尼（Vern Anthony）的建议和讨论，教学人员和培生教育出版社其他人员的辛勤工作和奉献才使教科书成为现实。洛伊丝·波特（Lois Porter）完成了手稿编辑，她一贯惊人地注重细节，提出改进建议并做了大量工作。雷克斯·戴维森（Rex Davidson）娴熟地把握许多细节，您才能看到现在的最终作品。策划编辑林赛普·吕多姆（Lindsey Prudhomrne）和拓展编辑丹·揣顿（Dan Trudden）对本书提供了有效的全面指导。还要感谢美国国家仪器公司马克·维特（Mark Waiters）帮助准备 Multisim 附录，感谢加里·斯奈德（Gary Snyder）帮助准备 Multisim 仿真文件。

Thomas L. Floyd

David Buchla

推荐阅读







模拟电子技术基础（第2版）

作者：黄丽亚 杨恒新 ISBN：978-7-111-38699-5 定价：39.00元

本书精选内容，突出重点，强化三基。以分立元件电路为基础，以集成电路为重点，强调概念的物理本质和含义。注重培养电路设计能力。注重模拟电路与数字电路教学内容的衔接，将集成门电路内容纳入模拟电路部分。第2版在第1版的基础上，增加有源滤波器设计举例、滤波器设计软件FilterPro简介；更新Multisim 8至Multisim 11，增加Multisim 11应用举例；删除了ispPAC芯片相关内容。可作为电子信息、电气、自动化、控制类等专业"模拟电子技术"课程教材。

信号与系统：使用变换方法和MATLAB分析（原书第2版）

作者：（美）M. J. Roberts 译者：胡剑凌 中文版 预计出版时间：2013年4月

信号与系统课程是数字信号处理和控制理论等课程的基础课程，本书以主要涵盖傅里叶变换、傅里变换分析、拉普拉斯变换、拉普拉斯变换分析、离散时间系统的z变换、z变换分析等。书中给出了大量的例子，并介绍实现分析方法的MATLAB函数和运算。可作为电子信息类相关专业的本科生教材。

数字信号处理：系统分析与设计（原书第2版）

作者：（巴西）Paulo S. R. Diniz 等 译者：张太镒 等 ISBN：978-7-111-41475-9 定价：85.00元

英文版 ISBN：978-7-111-38253-9 定价：79.00元

本书全面、系统地阐述了数字信号处理的基本理论和分析方法，详细介绍了离散时间信号及系统、傅里叶变换、z变换、小波分析和数字滤波器设计的确定性数字信号处理，以及多重速率数字信号处理系统、线性预测、时频分析和谱估计等随机数字信号处理，使读者深刻理解数字信号处理的理论和设计方法。本书不仅可以作为高等院校电子、通信、电气工程与自动化、机械电子工程和机电一体化等专业本科生或研究生教材，还可作为工程技术人员DSP设计方面的参考书。

目 录

第1章 系统、物理量及其单位

本章目标

- 简要介绍电子工业
- 介绍系统的特性
- 简要介绍电路的特性
- 使用科学记数法表示物理量
- 学习电气单位及其十进制前缀的表示方法
- 学习带有十进制前缀表示的单位之间的转换
- 强调测量数据的有效数字
- 学习辨别电气危险，掌握正确的安全规程

电子技术已经从分离电路的元件级分析排错向复杂系统的安装测试转变，技术人员必须更加熟悉系统集成，因此，为了理解系统的工作原理，每个即将进入电子技术领域的人都应当努力打好理论基础。本章首先介绍电子工业的概貌和电路与系统的特性，然后介绍基本单位、电气物理量以及在电子学领域常用的工程记数法和科学记数法。

1.1 电子工业

电子工业由在制造和销售电子产品上互相竞争的商业公司组成，由于这种激烈的竞争，技术创新和新产品开发日新月异，使得一批在很窄的市场领域的专业公司开始成长。

学习完本节内容，应该能够

- 从总体上描述电子工业；
- 简要描述工程师设计和测试新电路的过程；
- 解释纵向公司组织和横向公司组织的差异；
- 举例说明服务技术人员需要应用系统原理的技能；
- 讨论拥有特殊领域认证的优势。

电子工业特别是在半导体方面已经取得了革命性的技术进步，这些进步改变了电子工业，也改变了电路开发、构建和维修。一个电路由若干元器件互联而成并产生期望的结果。现代电路比过去更加紧凑、可靠性更高。如今，工程师们使用电路设计软件来设计新电路，电路设计软件可仿真电路的性能，并寻找潜在的问题（例如计时问题、散热问题或噪声问题）。计算机仿真能以最小成本对电路进行优化。当仿真结果达到电路设计要求后，工程师在计算机上可完成电路的印制电路板（PCB）自动布局布线并形成电路的元器件列表。至此，原型电路在48小时之内即可在家或一家专门从事印制电路板公司制作完成，然后由工程师对原型电路进行测试，再由产品审查团队对设计进行修改或改进。

除了计算机辅助设计和仿真，近年来，电子公司已经将重点从纵向结构向横向结构转移。纵向结构公司从原料到成品可能都由一个工厂来完成。而横向结构公司的各个环节则是分散的，各个环节更加专业化，公司往往将与自身专长不直接相关的工作外包出去。横向结构的一个特点是有许多小公司都参与到最终产品生产的中间环节，由一家专门的生产公司组装最终产品。这些较小的专门公司往往集中在一个区域，从而可以降低运输和仓储成本。对于某些货物，许多专门的供应商和组装公司一般位于制造成本较低的国家，这就导致许多产品会有多个原产地国家。

1.1.1 电子工业的主要分类

电子工业的两个主要类别是服务业和制造业。服务业支持所有的制造业及消费者，制造业

如图1-1所示。电子制造业包括元器件与印制电路板制造商和系统制造商，其中元器件与印制电路板制造商包括元器件与半导体和印制电路板，它是电子制造业的基础；系统制造商包括通信（广播）设备、计算机、可再生能源系统等制造商，它们将基础元器件和/或印制电路板集成为完整的系统。

当今电子产品的生产过程高度自动化，这些自动化过程涵盖从集成电路到印制电路板。集成电路是一个将若干电阻、晶体管和其他元器件制造在一个单元中的复杂电路，该单元可以完成多个分离组件电路的功能。电子工业生产过程的自动化使得消费者可以购买到更加廉价的电子产品，并促进了电子技术的不断发展（速度、可靠性和新功能）。

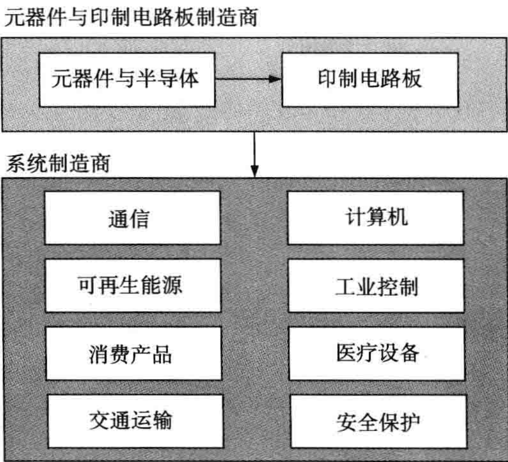


图1-1 电子制造业

如前所述，电子产品可靠性的提高促使了服务部门的工作重心从电路的故障排除和修复向系统方法转移。在服务部门，技术人员必须能够识别和快速检测故障板并更换，因此，技术人员需要具备更多的技能。而在生产部门，技术人员更需要在可编程序逻辑控制器（Programmable Logic Controllers，PLC）、计算机、机器人以及机械设备上工作。熟练的技术人员必须能将系统作为一个整体进行安装、维护和故障排查，无论故障可能出现在系统的哪个位置。这些工作往往涉及一类新的应用工程——机电一体化，这是机械和电子的有机组合。



图1-2 食品加工业中使用的自动称重秤（经Cornerstone Automation Systems公司许可转载）

也许令人惊讶的是，服务部门比生产部门提供了更多的就业机会，虽然这两部分有些重叠（如制造厂内维修服务部门）。许多服务部门的工作需要更广的技能，例如，安装和维护太阳能电力系统的技术人员必须有电气和电子系统的知识，还要能进行模块、接线盒、过流装置、接地设备和水泵的电气和机械安装，他或她必须能够测试和诊断系统，并且能在与系统相关的电气的和非电气的危险状况下安全工作。

制造商广泛使用机器和自动化系统进行工作，并且在必要时对系统进行重新编程。例如，在食品加工行业，通常利用许多专用设备进行分类、称重和包装，这些设备由电子系统控制。图1-2所示为食品加工业中常见的称重秤，该秤只是整个包装系统中的一个环节，该秤连接到数据采集装置并把数据发送到计算机，以确定产品是否在某个指定的范围内。如果包装的大小发生了变化，技术人员将在控制器中重新设置可接受的限制范围。

服务部门同样也需要技术人员具备各种电子技术技能，包括高科技通信设备（例如广播电视设备）、集成系统、太阳能和风能系统等的安装与维护，服务领域其他相关的岗位有技术培训、专业作家、客户服务代表和销售员等。

1.1.2 授权

几乎在每个领域，都有专业组织机构颁发专业认证资格证书，资格证书不仅证明个人在给

定的技术领域所具备的技能，同时也是雇主和（或）公众提供判断其能力的依据。在广播领域，资格证书颁发机构是国际无线电、通信与电磁学协会（interNational Association for Radio，Telecommunications，and Electromagnetics，iNARTE），该组织还负责管理美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission，FCC）商业经营许可证考试。在能源领域，北美能源从业人员认证局（North American Board of Certified Energy Practitioners，NABCEP）是许多技术岗位的认证机构，它可以发放光伏系统、太阳能热系统或小型风电系统安装的认证证书。任何领域的认证证书不能替代国家或政府机构所需的许可证要求，但对于未来的求职者而言表明其在该领域的技能却是很有用的。

本节测试题

1. 在构造一种新型电路前进行计算机仿真具有哪些优点？
2. 电子工业的两个主要分类是什么？
3. 给出电子系统制造行业中的六个产品类别名称。
4. 认证的目的是什么？

1.2　电子系统概述

电子系统由设计用来完成某一特定功能的一系列部件和电路组合而成。从简单的车库门到如雷达那样的复杂系统都是电子系统的实例。

学习完本节内容，应该能够

- 描述系统的属性；
- 给出术语*系统*的定义，该定义既适用于电气系统也适用于电子系统；
- 解释方框图的用途，读懂基本方框图；
- 给出一个电子系统中某个方框的传输曲线例子。

1.2.1　系统的概念

*系统*由一组相互关联的执行特定功能的部件组成，*边界*是系统组成部分与其所在环境的分界线，如图1-3所示。

系统通过输入、输出与外界联系，在电气电路中，*输入*是施加于电路并希望得到预期结果的电压、电流或功率，*输出*则是系统对一个或多个输入处理完后所得到的结果，系统可以有多个输入和多个输出。虽然任何系统都不可能完全独立于它的环境，然而为了简化系统的分析，常常将系统从环境中独立出来处理，即使如国际空间站（International Space Station，ISS）这样看似孤立的系统，也要接收太阳能能源、向太空中辐射热，并且受地球的重力场作用。

图1-3　系统及其工作环境

电气系统　电气系统主要用于电力。电气系统的一个典型例子是住房的电源布线，通常情况下，把外墙和屋顶作为边界，室内的空间包括地下室和阁楼定义为系统，通过接线盒连接到电网，完成系统的输入，输出则在室内（或室外）连接负载的特定位置。边界可以根据分析的需要而作相应改变。对于住房布线系统，该系统的组成部分可以认为是一个系统或子系统（如厨房电路）。

电子系统　通常情况下，电子系统主要用于信号而不是电力。电子系统中，信号一般是变化的承载着信息的电气量或电磁量。如果系统的某一特定输入从不发生变化，那么这种不包含任何信息的输入将不被视为信号。大多数电子系统处理载有信号的信息。因为实际电气系统经常使用电子元件作为调节装置，而电子系统中一般也会用到提供必要电力的电气子系统，所以，电子电路与电气电路之间的区别常常被模糊。

1.2.2　方框图

电子系统一般包括一个过程的逻辑序列。为了简化复杂系统和表示过程顺序，常将系统绘制成方框图的形式。方框图以图形表示系统结构的模型，用标记块来表示功能，用线条表示信号流。例如，数字温度计系统方框图如图1-4所示。假定温度传感器输出电压随环境温度变化，传感器输出信号通过放大器进行放大，然后发送到模-数转换器（analog-to-digital converter，ADC，ADC将放大器输出的连续电压转换为数字），除了基本的处理，数字数据还可以存储并准确地恢复，并且数字数据比模拟数据受噪声影响小得多。处理器将数字数据转换为显示的温度读数，该系统的显示是发光的数字。方框图表示了系统的主要部分和信号流程，但是并不显示电路细节。



图1-4　数字温度系统方框图

系统举例1-1　方框图与流程图

在很多场合都能应用数据采集系统，通常，这些系统需要将模拟量转换为数字量，模-数转换器（ADC）是其中的一个关键部分。系统分析员可以利用方框图或流程图解释系统中逐次逼近ADC的关系，其中方框图用于描述整个系统的信号流，而流程图则用于表示系统中各个控制逻辑块执行的逻辑过程。

方框图和流程图的区别如图1-5所示。图1-5a为硬件部分的方框图，它给出了信号的流程但并未说明控制逻辑必须执行的细节，控制逻辑块是整个系统的一个部分；图1-5b是系统的流程图，它细化了系统逻辑块执行的逻辑操作。

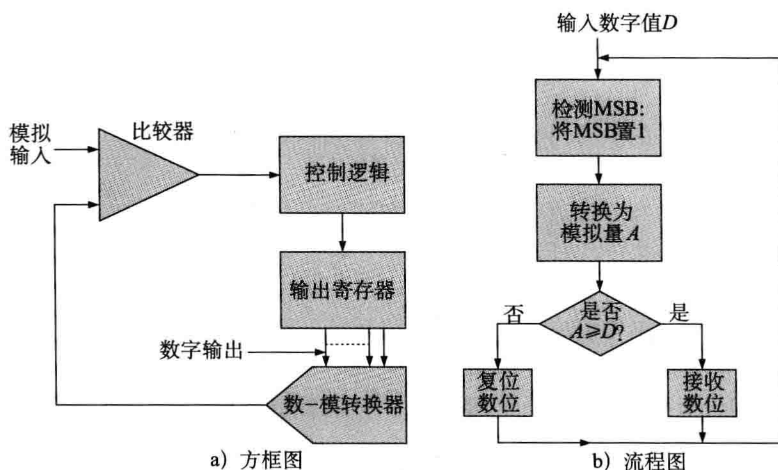


图1-5　方框图与流程图的比较

方框图描述了系统中信号的流向，根据输入（模拟）信号与输出（数字）信号的比较结果，电路中用控制逻辑电路来确定要采取的操作；而流程图则表示了系统中信号处理的逻辑关系。因此，总的系统描述最好采用两种类型的关系图，以表明信号的流向和逻辑处理关系。

1.2.3　传输曲线

传输曲线就是系统输入输出的比例关系图。在电子系统中，传输曲线（或响应曲线）非常有用，它描述了系统对于给定输入的响应。可以用传输曲线描述一个给定块或一组块的特性。

例如，在图1-4所示的数字温度计中放大器是用来放大来自温度传感器的微弱信号以便进行模-数转换。理想情况下，线性放大器的传输曲线是一条直线，如图1-6所示，输入是一个小的电压，沿 x 轴绘制，而输出是一个按比例放大的电压，绘制在 y 轴上。对任意一个小的输入电压，输出电压都按同一因子放大，这个因子称为*增益*。在示例中增益为10，对任一给定的输入电压，输出都扩大10倍。

放大器传输曲线是两个电压的比值，因此无量纲，用（V_{out}/V_{in}）表示放大器的电压增益。理想情况下，线性放大器的传输曲线是一条直线，表明对任意输入放大器增益为常数，实际上，放大器在一定输入范围内往往很接近这种理想特性，但放大器并非是“完美的”。

在某些情况下，输入和输出可能有不同的单位，这种情况下传输曲线不会无量纲的。例如，某传感器的传输曲线可能显示电阻随温度变化的函数（相对于电流变化），这是典型的热敏电阻（一种温度传感器）传输特性，如图1-7所示。注意这种传感器具有非线性响应，在传输曲线上很容易找到对应输入的输出点，如果将它用做数字温度计系统中的传感器，数据必须进行某种形式的处理，才能将其输出转换成温度读数，然后显示。

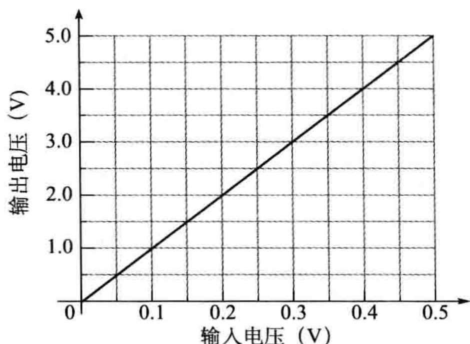


图1-6　增益为10的放大器理想传输曲线

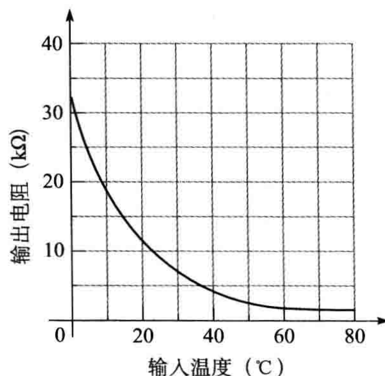


图1-7　典型温度传感器的传输曲线

本节测试题

1. 什么是数字温度计系统的输入和输出？
2. 将国际空间站视为一个系统，构成该系统环境的是什么？
3. 方框图有什么作用？
4. 对于给定的块，其输入、输出比例关系图的名称是什么？

1.3　电路的分类

电气系统用于电力，而电子系统用于信号处理，电气系统可以是直流（direct current，dc）或交流（alternating current，ac），电子系统通常都需要某种形式的电源，因此对于电气系统和电子系统的学习理解是很重要的，幸运的是这两种系统大部分基本定律是相同的，本节着重介绍电气和电子系统中的电路类型。

学习完本节内容，应该能够

- 概述电路；
- 解释有源器件和无源器件的区别；
- 说出交流和直流电路在配电系统中的应用；
- 比较数字和模拟电子电路；
- 定义传感器。

1.3.1 元件

单词电路（circuit）源于拉丁单词 circuitus，意思是到处转动。电气电路必须有完整的路径（类似一个圆圈），从电源开始，经过负载再返回到电源。当电路含有完整的路径时，称为闭合；如果闭合路径被破坏，则称为开路。电路中除了含有一个或多个电源外，还包含一些用于改变电路电气性能的设备，称为元件。如果元件的工作不需要电源，称为*无源元件*；而如果元件工作需要电源，则称为*有源元件*。无源元件不能增加信号功率；有源元件则可以增加信号功率。大多数系统包含这两种类型的元件。

三个基本的无源元件是电阻器、电容器和电感器，其他无源元件有二极管、变压器、电池和电机。电池之所以被认为是一个无源元件，是因为它不能增加信号的功率（尽管电池对外供应电能）。

有源元件通常能够增加信号的功率，包括晶体管、运算放大器和微处理器。有时信号不一定是从外部输入到系统的，而是在系统内部产生，电子*振荡器*电路就是一个典型的例子，振荡器的输出是由其内部生成的，而生成输出的器件被认为是有源器件。振荡器是一种产生连续输出的电路，可以输出不同的波形，振荡器常用于电信、测试仪器和计算机等方面。

1.3.2 电气电路

电气电路产生、传输和控制电力能源，电气电路可以是交流或直流的形式。

交流电路 交流电流（ac）每秒钟改变极性一定次数（频率），国际上电力网通常采用交流（有一些例外）。产生交流电源的最常见方法是使用*交流发电机*，即 ac 发生器。8.6 节中将详细讨论交流发电机。

交流与直流相比，电压变换（从低电压变换到高电压或从高电压变换到低电压）更容易，成本也更低（但是有一些非常高的电压系统使用直流），高电压作远距离传输效率很高，所以几乎所有配电系统都使用交流。历史上，电力公司只是发电并向客户供电，并不关心互联的问题，结果就出现了采用不同频率和电压的各式各样的系统，引起互联的混乱。现在，世界上不同国家只能选择两个频率之一作为标准，世界大多数的国家标准频率是 50Hz（赫兹是频率的单位），而美国和北美地区采用 60Hz 频率[⊖]。对于飞机和某些军事应用重量是关键，为了使元件更小、更轻而采用 400Hz 频率。

直流电路 直流电流（dc）不改变电流的极性（不像 ac）。虽然大多数市电电源是交流，但已经有高压直流（HVDC）技术用于某些长距离传输和水下传输。为了高效传输将直流转换到很高的电压比交流更昂贵，但是，每英里塔架和输电线路的成本则较低。因此，对于长距离输电直流更符合成本效益，直流还可用于连接两个不同步的独立交流网络，这种情况在日本就存在，因为日本同时使用两个完全不同的频率（50Hz 和 60Hz），一些低电压军事设施和飞机系统也采用直流发电来供电，典型的电压为 28V。

1.3.3 电子电路

众所周知，电子电路用于信号处理，单纯的直流虽然不包含信号信息，但是在电子应用中却是非常重要的，因为有源电子电路必须直流供电，所以，对直流电路的学习是理解电气系统和电子系统的基础。直流电源包括干电池、燃料电池、太阳电池和直流发电机，这些电源将在 2.3 节中讨论。获取直流电的常用方法是将交流电转换为直流电源（直流稳压电源），这将在 3.7 节中讨论。

⊖ 我国电力网统一采用 50Hz 频率。——译者注

信号通过改变参数（如电压或频率）来携带信息。信号主要分为两类，离散信号称为数字信号；大小连续变化的信号称为模拟信号。某些情况下信号是由系统内部生成的，例如图 1-8 所示的自行车警示灯，这是一个简单的数字系统，其中闪烁的信号就是内部生成的。

模拟信号在允许的范围内连续变化。作为模拟信号的例子，考虑调幅（AM）无线电信号，广播电台传送高频信号（称为载波），载波的振幅被较低频率信号改变（或调制），图 1-9 显示了一个模拟的调幅信号，这是模拟信号的一个示例，这里信息包含在包络中。

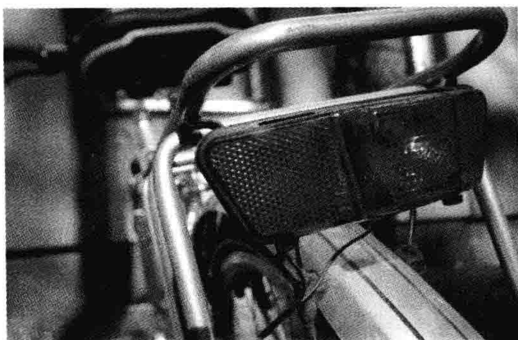


图 1-8　自行车警示灯（经 natenn/iStockphoto.com 许可转载）

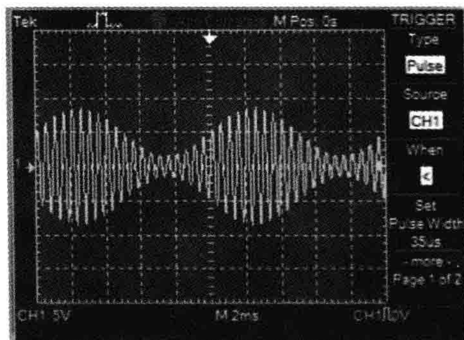


图 1-9　模拟调幅无线电波

人们常常将包含模拟部分和数字部分的电子电路看成同一电路（如前一节所述的数字温度计），从模拟信号转换为数字信号的工作由一个转换器（ADC）完成，转换器往往从传感器接收输入。传感器是一种将能量从一种形式转换为另一种形式的器件，在电子系统中，能量的一种形式就是电信号。数字温度计系统中的温度传感器就是输入传感器的示例，这种传感器将温度转换为电压，然后再转换为数字信号进行处理。

某些情况下，如音频，可能需要将数字信号转换为模拟信号，这一过程由数-模转换器来完成。例如，CD 播放机从 CD 获取数字信号并处理，然后转换为模拟输出，模拟信号经放大后送到扬声器，而扬声器是输出传感器，它将电能转换为声音。

本节测试题

1. 无源元件和有源元件的区别是什么？
2. 为什么电池不能被认为是电子器件？
3. 在世界上绝大多数电网使用的两种频率是什么？
4. 直流为什么对有源电路重要？
5. 数字电路和模拟电路的区别是什么？
6. 什么是传感器？

1.4　科学记数法与工程记数法

在电气系统和电子系统中，常会同时遇到非常小和非常大的物理量，例如，电流的范围可以从电力应用的数百安培到许多电子电路中的千分之几或百万分之几安培，这一取值范围对许多其他电气物理量也是典型的。工程记数法是科学记数法的一种特殊形式，它广泛应用在技术领域用来表示很大和很小的物理量。在电子学领域，用工程记数法来表示电压、电流、功率、电阻和其他物理量。

学习完本节内容，应该能够

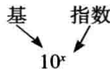
- 使用科学记数法来表示物理量；
- 使用 10 的乘方表示任意数；

● 使用10的乘方进行计算。

科学记数法提供了一种表示大数和小数以及涉及这类数计算的便利方法。在科学记数法中，一个量表示为1到10之间的数（小数点左侧只有一位数字）与10的乘方相乘。例如，150 000用科学记数法表示为1.5×10^5，而0.000 22用科学记数法表示为2.2×10^{-4}。

1.4.1 10的乘方

表1-1列出了一些十的正幂和负幂与相应的十进制数。10的乘方表示基数为10的指数。



指数是基数右上角的数字，指数表示小数点右移或左移生成十进制数的位数，对于十的正幂，右移小数点得到相应的十进制数。以指数4为例：

$$10^4=1\times10^4=1.0000.=10\ 000$$

对于十的负幂，左移小数点得到相应的十进制数。以指数−4为例：

$$10^{-4}=1\times10^{-4}=.0001.=0.0001$$

负指数并不表示这个数是负的，只是简单地将小数点左移。

表1-1 十的部分正幂和负幂

$10^6=1\ 000\ 000$	$10^{-6}=0.000\ 001$
$10^5=100\ 000$	$10^{-5}=0.000\ 01$
$10^4=10\ 000$	$10^{-4}=0.0001$
$10^3=1000$	$10^{-3}=0.001$
$10^2=100$	$10^{-2}=0.01$
$10^1=10$	$10^{-1}=0.1$
$10^0=1$	

【例1-1】 用科学记数法表示下列各数。

(a) 240 (b) 5100 (c) 85 000 (d) 3 350 000

解： 每种情况下，左移小数点适当的位置数就是十的正幂指数。

(a) $240=2.4\times10^2$ (b) $5100=5.1\times10^3$

(c) $85\ 000=8.5\times10^4$ (d) $3\ 350\ 000=3.35\times10^6$

相关问题[⊖]：用科学记数法表示750 000 000。

【例1-2】 用科学记数法表示下列各数。

(a) 0.24 (b) 0.005 (c) 0.000 63 (d) 0.000 015

解： 每种情况下，右移小数点适当的位置数就是十的负幂指数。

(a) $0.24=2.4\times10^{-1}$ (b) $0.005=5\times10^{-3}$

(c) $0.000\ 63=6.3\times10^{-4}$ (d) $0.000\ 015=1.5\times10^{-5}$

相关问题：用科学记数法表示0.000 000 93。

【例1-3】 把下列各数表示为标准十进制数。

(a) 1×10^5 (b) 2.9×10^3 (c) 3.2×10^{-2} (d) 2.5×10^{-6}

解： 分别按照十的正、负幂指数向左或向右移动小数点的位置。

(a) $1\times10^5=100\ 000$ (b) $2.9\times10^3=2900$

(c) $3.2\times10^{-2}=0.032$ (d) $2.5\times10^{-6}=0.000\ 002\ 5$

相关问题：把8.2×10^8表示为标准十进制数。

1.4.2 10的乘方的计算

科学记数法的优势在于非常小或非常大的数字的加、减、乘、除运算。

⊖ 相关问题的答案位于章末。

加法　含 10 的乘方的数的加法运算步骤如下：

1）把所有进行加法的数表示成同指数的 10 的乘方；

2）把与 10 的乘方相乘的部分相加得到和；

3）按科学记数法降低同指数的 10 的乘方，这就是和的 10 的乘方。

【例 1-4】　求 2×10^{6} 与 5×10^{7} 的和并用科学记数法表示结果。

解：1）把两个数表示成同指数的 10 的乘方：$(2\times10^{6})+(50\times10^{6})$；

2）相加：$2+50=52$；

3）降低同指数的 10 的乘方（10^{6}），则和为 $52\times10^{6}=5.2\times10^{7}$。

相关问题：求 4.1×10^{3} 与 7.9×10^{2} 的和。

减法　含 10 的乘方的数的减法运算步骤如下：

1）把所有相减的数表示成同指数的 10 的乘方；

2）把与 10 的乘方相乘的部分相减得到差；

3）按科学记数法降低同指数的 10 的乘方，这就是差的 10 的乘方。

【例 1-5】　求 7.5×10^{-11} 减去 2.5×10^{-12} 的差，并用科学记数法表示结果。

解：1）把每个数都表示成同指数的 10 的乘方：$(7.5\times10^{-11})-(0.25\times10^{-11})$；

2）相减：$7.5-0.25=7.25$；

3）乘以共同的 10 的乘方（10^{-11}），则差为 7.25×10^{-11}。

相关问题：求 2.2×10^{-5} 减去 3.5×10^{-6} 的差。

乘法　含 10 的乘方的数的乘法运算步骤如下：

1）对相乘各数与 10 的乘方相乘的部分直接相乘；

2）对各个相乘数的 10 的乘方部分（指数不必相同），将它们的指数代数相加，得到乘积的 10 的乘方指数。

【例 1-6】　求 5×10^{12} 与 3×10^{-6} 的积，并用科学记数法表示结果。

解：两数相乘指数相加

$$(5\times10^{12})\times(3\times10^{-6})=15\times10^{12+(-6)}=15\times10^{6}=1.5\times10^{7}$$

相关问题：求 1.2×10^{3} 与 4×10^{2} 的乘积。

除法　含 10 的乘方的数的除法运算步骤如下：

1）对相除运算的数与 10 的乘方相乘的部分直接相除；

2）对相除各数的 10 的乘方部分（指数不必相同），将它们的指数代数相减，得到商的 10 的乘方指数。

【例 1-7】　求 5.0×10^{8} 除以 2.5×10^{3} 的商，并用科学记数法表示结果。

解：把除法表示成分式

$$\frac{5.0\times10^{8}}{2.5\times10^{3}}$$

两数相除，10 的乘方指数相减（8 减去 3）

$$\frac{5.0\times10^{8}}{2.5\times10^{3}}=2\times10^{8-3}=2\times10^{5}$$

相关问题：求 8×10^{-6} 除以 2×10^{-10} 的商。

计算器上的科学记数法　在大多数计算器上使用 EE 键以科学记数法输入数字：输入小数点左边的一位数字，然后按 EE 键，再输入 10 的幂指数。这种方法需要在输入数字前先确定好这个数的 10 的幂指数。有些计算器设置了将任意十进制数自动转换成科学记数法的模式。

【例 1-8】 用 EE 键以科学记数法输入 23 560。

解： 左移小数点 4 位将小数点放在 2 后面，这样得到该数的科学记数法表示：

$$2.3560\times10^{4}$$

在计算器上输入



注意不需要输入 0。

相关问题：用 EE 键输入 573 946。

1.4.3 工程记数法

工程记数法与科学记数法相似，然而，**工程记数法**中一个数的小数点左边可以有一到三位数字，而 10 的乘方指数必须是 3 的倍数。例如，33 000 以工程记数法表示为 33×10^{3}，而在科学记数法中则应表示为 3.3×10^{4}；再如，0.045 以工程记数法表示为 45×10^{-3}，在科学记数法中则表示为 4.5×10^{-2}。工程记数法在使用公制前缀的电气和电子计算中很有用。

【例 1-9】 以工程记数法表示下列各数。

(a) 82 000　　(b) 243 000　　(c) 1 956 000

解： 在工程记数法中，

(a) 82 000 表示为 82×10^{3}；

(b) 243 000 表示为 243×10^{3}；

(c) 1 956 000 表示为 1.956×10^{6}。

相关问题：以工程记数法表示 36 000 000 000。

【例 1-10】 将下列各数转换成工程记数法表示。

(a) 0.0022　　(b) 0.000 000 047　　(c) 0.000 33

解： 在工程记数法中，

(a) 0.002 2 表示为 2.2×10^{-3}；

(b) 0.000 000 047 表示为 47×10^{-9}；

(c) 0.000 33 表示为 330×10^{-6}。

相关问题：以工程记数法表示 0.000 000 000 005 6。

计算器上的工程记数法 用 EE 键输入小数点左边一、二或三位的数字，然后按 EE 键，再输入 3 的倍数的 10 的幂次。这种方法也需要在输入数字前先确定好这个数的 10 的幂次。

【例 1-11】 用 EE 键以工程记数法输入 51 200 000。

解： 将小数点左移 6 位到数字 1 的后面，以工程记数法表示该数：

$$51.2\times10^{6}$$

在计算器上输入数字：



相关问题：用 EE 键以工程记数法输入数字 273 900。

本节测试题

1. 科学记数法使用 10 的乘方（T 或 F）。
2. 将 100 表示为 10 的乘方。
3. 用科学记数法表示下列各数。

   (a) 4350

(b) 12 010

(c) 29 000 000

4. 用科学记数法表示下列各数。

(a) 0.760

(b) 0.000 25

(c) 0.000 000 597

5. 作下列运算。

(a) $(1\times10^5)+(2\times10^5)$

(b) $(3\times10^6)\times(2\times10^4)$

(c) $(8\times10^3)\div(4\times10^2)$

(d) $(2.5\times10^{-6})-(1.3\times10^{-7})$

6. 在你的计算器上用科学记数法输入问题 3 中的各个数。

7. 用工程记数法表示下列各数。

(a) 0.0056

(b) 0.000 000 028 3

(c) 950 000

(d) 375 000 000 000

8. 在你的计算器上用工程记数法输入问题 7 中的各个数。

1.5 单位与公制前缀表示方法

在电子技术中必须处理可测物理量，例如，必须能够表达电路中某个测试点测得多少伏电压，有多大的电流流过导体，或某个放大器输出多大功率等。本节将介绍本书使用的电气量的单位和符号，在工程记数法中使用公制前缀作为某些常用 10 的乘方的“速记”简化表达。

学习完本节内容，应该能够

- 使用电气单位和公制前缀；
- 命名十二个电气量的单位；
- 列举电气单位的符号；
- 列出公制前缀；
- 将工程记数法的 10 的乘方转换为公制前缀；
- 使用公制前缀表示电气量。

1.5.1 电气单位

电子学中使用字母符号表示物理量及其单位，一个符号用于表示物理量的名称，另一个符号用于表示这个物理量的测量单位。表 1-2 列出主要电气量和它们 SI 制单位及符号，例如，斜体字母 *P* 表示功率，而非斜体字母 W 表示功率的单位瓦特。一般用斜体字母表示物理量而用非斜体字母表示单位。注意，能量用斜体 *W* 来缩写，而 *W* 用于表示做功，能量和做功具有相同的单位（焦耳，J)。术语 SI 是国际单位制的法语缩写（Système International)。

表 1-2　电气量及其 SI 单位和符号

物理量	符号	SI 单位	符号	物理量	符号	SI 单位	符号
电容	*C*	法拉	F	电荷	*Q*	库仑	C
电导	*G*	西门子	S	电流	*I*	安培	A
能量或做功	*W*	焦耳	J	频率	*f*	赫兹	Hz
阻抗	*Z*	欧姆	Ω	电感	*L*	亨利	H
功率	*P*	瓦特	W	电抗	*X*	欧姆	Ω
电阻	*R*	欧姆	Ω	电压	*V*	伏特	V

除了表 1-2 所列的常用电气量，SI 制还有许多由某些基本单位定义的其他单位。1954 年通过国际协议将米、千克、秒、安培、开尔文、坎德拉确定为 SI 制的基本单位，它们构成米、千克、秒（mks）单位的基础，用于导出其他量的单位，并已成为几乎所有科学和工程工作的首选单位。cgs 制是一个旧的度量系统，它基于厘米、克、秒为基本单位。目前仍然有一些广泛使用的单位是基于 cgs 单位制的，例如，磁通的 cgs 制单位高斯仍然通用。除非另有说明，

本书首选使用mks制单位。

1.5.2 公制前缀

工程记数法中用公制前缀表示一个常用的10的乘方。公制前缀的符号和对应的10的乘方如表1-3所示。

表1-3 公制前缀的符号和对应的10的乘方及数值

公制前缀	符号	10的乘方	数值	公制前缀	符号	10的乘方	数值
费	f	10^{-15}	一千万亿分之一	千	k	10^{3}	一千
皮	p	10^{-12}	一万亿分之一	兆	M	10^{6}	一百万
纳	n	10^{-9}	十亿分之一	吉	G	10^{9}	十亿
微	μ	10^{-6}	一百万分之一	太	T	10^{12}	一万亿
毫	m	10^{-3}	一千分之一				

公制前缀只用于具有测量单位（如伏特、安培、欧姆）的数值并写在单位符号的前面。例如，0.025安培可用工程记数法表示为25×10^{-3}A，用公制前缀可表示为25mA，读做25毫安，这里用公制前缀毫（milli）替代了10^{-3}。再看另一个例子，阿尔法文图斯（Alpha Ventus）海上风力发电系统有12个风力发电机，每个发电机能够提供5 000 000W电力，表示为5.0MW，系统产生60 000 000W电力，就是60MW，这两个功率表示中都用公制前缀兆（mega）替换了10^{6}。

【例1-12】 用公制前缀表示下列各量。

(a) 50 000V　　(b) 25 000 000Ω　　(c) 0.000 036A

解：(a) $50\ 000\text{V}=50\times10^{3}\text{V}=50\text{kV}$

(b) $25\ 000\ 000\Omega=25\times10^{6}\Omega=25\text{M}\Omega$

(c) $0.000\ 036\text{A}=36\times10^{-6}\text{A}=36\mu\text{A}$

相关问题：用公制前缀表示下列各量。

(a) 56 000 000Ω　　(b) 0.000 470A

本节测试题

1. 列出下列10的乘方的公制前缀：10^{6}、10^{3}、10^{-3}、10^{-6}、10^{-9}、10^{-12}。
2. 用公制前缀表示0.000 001A。
3. 用公制前缀表示250 000W。

1.6 公制单位转换

有时根据需要或方便，要将一个用单位与公制前缀表达的物量转换成另一种单位与公制前缀，如从毫安（mA）转换为微安（μA）。这时只要根据转换的关系将小数点左移或右移适当位即可实现公制单位的换算。

学习完本节内容，应该能够

- 从一种公制前缀单位转换为另一种；
- 毫（milli）、微（micro）、纳（nano）和皮（pico）之间的转换；
- 千（kilo）和兆（mega）之间的转换。

公制单位转换的基本规则如下：

1. 大单位向小单位转换时小数点向右移。
2. 小单位向大单位转换时小数点向左移。
3. 小数点移动的位数由转换前后公制前缀代表的10的乘方指数之差决定。

例如，在从毫安（mA）转换到微安（μA）时，转换前后公制前缀代表的10的乘方指数之差为3（mA为10^{-3}A，μA为10^{-6}A），因此，小数点向右移动3位。下面举例说明如何转换。

【例1-13】 将0.15毫安（0.15mA）转换为微安（μA）。

解： 将小数点右移3位。

$$0.15\text{mA}=0.15\times10^{-3}\text{A}=150\times10^{-6}\text{A}=150\mu\text{A}$$

相关问题：将1毫安转换为微安。

【例1-14】 将4500微伏（4500μV）转换为毫伏（mV）。

解： 将小数点左移3位。

$$4500\mu\text{V}=4500\times10^{-6}\text{V}=4.5\times10^{-3}\text{V}=4.5\text{mV}$$

相关问题：将1000μV转换为毫伏。

【例1-15】 将5000纳安（5000nA）转换为微安（μA）。

解： 将小数点左移3位。

$$5000\text{nA}=5000\times10^{-9}\text{A}=5\times10^{-6}\text{A}=5\mu\text{A}$$

相关问题：将893nA转换为微安。

【例1-16】 将47 000皮法（47 000pF）转换为微法（μF）。

解： 将小数点左移6位。

$$47\ 000\text{pF}=47\ 000\times10^{-12}\text{F}=0.047\times10^{-6}\text{F}=0.047\mu\text{F}$$

相关问题：将10 000pF转换为微法。

【例1-17】 将0.000 22微法（0.000 22μF）转换为皮法（pF）。

解： 将小数点右移6位。

$$0.000\ 22\mu\text{F}=0.000\ 22\times10^{-6}\text{F}=220\times10^{-12}\text{F}=220\text{pF}$$

相关问题：将0.002 2μF转换为皮法。

【例1-18】 将1800千欧（1800kΩ）转换为兆欧（MΩ）。

解： 将小数点左移3位。

$$1800\text{k}\Omega=1800\times10^{3}\Omega=1.8\times10^{6}\Omega=1.8\text{M}\Omega$$

相关问题：将2.2kΩ转换为兆欧。

进行带公制前缀物理量加或减运算时，首先要将它们的公制前缀统一起来。

【例1-19】 计算15mA与8000μA的和，并将结果表示为毫安。

解： 先把8000μA转换为毫安，然后相加。

$$15\text{mA}+8000\mu\text{A}=15\text{mA}+8\text{mA}=23\text{mA}$$

相关问题：计算2873mA与10 000μA的和。

本节测试题

1. 将0.01MV转换为千伏（kV）。
2. 将250 000pA转换为毫安（mA）。
3. 计算0.05MW与75kW的和，并将结果表示为kW。
4. 计算50mV与25 000μV的和，并将结果表示为mV。

1.7　测量数据

由于所使用的测量工具的限制，对物理量进行测量时得到的结果总存在一定的不准确性，实际上所测量的数值包含近似数，矫正过的数字称为有效数字。报告测量数据时，保留的有效数字的不确定位数应不超过一个。

学习完本节内容，应该能够

- 正确使用有效数字表示测量数据；
- 定义准确度、误差和精度；
- 正确舍入数据。

1.7.1 误差、准确度和精度

由于实验中测量数据的准确性取决于所使用测试设备的准确性和测量条件，因此，实验获取的数据是不完美的，为了正确地报告测量数据，应将与测量相关联的误差考虑在内。测量误差不是测量错误，所有未经计算的测量值都是真值的近似值，物理量的真值或最佳可接受值[㊀]与测量值之差称为*误差*。如果误差很小说明测量是准确的。*准确度*是测量误差范围的度量，例如，如果测量厚度为10.00mm的量块，用千分尺测得为10.8mm，这一读数是不准确的，因为量块被认为是工作标准，而如果测得是10.02mm，则这个数值就是准确的，因为它与标准值吻合。

系统注释 校准设备

如果要校准电子设备，必须理解精度和准确性。校准（calibration）就是用给定设备与标准进行比较。一般用做校准的标准必须比被校准设备精度（precise）高4倍，但是这仍然不能保证其准确性。为了保证准确，校准应得到国家标准认证[㊁]（在美国，即美国国家标准与技术研究所），标准必须定期重新认证，以确保其准确性。

另一个与测量特性关联的术语是精度。*精度*是一个物理量测量的重复性（或一致性）的度量，它是对物理量的一组测量数据不分散的精确测量，但由于测量仪器的误差，每次测量都是不准确的。例如，一个未校准仪表的测量结果是不准确的，但它每次测量却是一致（精确）的。除非仪表本身也是精确的，否则就不可能得到准确的测量结果。

1.7.2 有效数字

在测量数据中已知是正确的数字称为*有效数字*。大多数测量仪器显示适当位数的有效数字，但有些仪器可以显示部分非有效数字，由用户确定应读出的内容，这一现象在有负载效应（6.4节讨论）的情况下出现。一个仪表会因为其在电路中的不同接法而改变测量读数，因此，能辨别出什么样的读数是不准确的非常重要，从而不记录这些不准确的数字。

关于有效数字的另一个问题出现在对数值的数学运算上，运算结果的有效数字位数永远不应该超过原始测量中的有效数字位数。例如，1.0V除以3.0Ω，计算器显示0.333 333 33。由于每个原始数据都只含有二位有效数字，因此，结果只能有相同的有效数字位数，应写为0.33A。

确定有效数字位数的规则如下：

1. 非零的数字都是有效数字。
2. 在第一个非零数字左边的零不是有效数字。
3. 非零数字中间的零都是有效数字。
4. 小数点右边的零是有效数字。
5. 小数点左边的零是否为有效数字视测量而定。例如，数值12 100Ω可以有三、四或五位有效数字，为了标明有效数字，必须使用科学记数法（或公制前缀），如12.10kΩ具有四位有效数字。

报告测量的值时可以保留一位不确定数字，其他不确定的位数应丢弃。要确定数值的有效位数，先忽略小数点，由左到右从第一个非零数字开始数到右边最后一位数字，最右端零可能

㊀ 又称为实际值，由高一等级测量设备测量所得。——译者注
㊁ 我国为国家计量局。——译者注

是有效数字也可能不是有效数字，如没有其他信息，数值最右边的零是否有效是不确定的。通常情况下，这些零只是占位符而不是测量的一部分，因而是非有效数字，为了避免混淆，应使用科学或工程的记数法来表示有效数字的零。

【例 1-20】　分别用二、三、四位有效数字表示测量数据 4300。

解： 由于小数点右边的零是有效数字，因此，二位有效数字表示为

$$4.3\times10^3$$

三位有效数字表示为

$$4.30\times10^3$$

四位有效数字表示为

$$4.300\times10^3$$

相关问题：如何用三位有效数字表示数值 10 000?

【例 1-21】　在下列测量数据中划出其有效数字。

(a) 40.0　　(b) 0.3040　　(c) 1.20×10^5　　(d) 120 000　　(e) 0.005 02

解：(a) 40.0 有三位有效数字，见规则 4。

(b) 0.3040 有四位有效数字，见规则 2 和 3。

(c) 1.20×10^5 有三位有效数字，见规则 4。

(d) 120 000 至少有二位有效数字，虽然这个数值与 (c) 相同，但这里的零是不确定有效数字，见规则 5，因此，不建议用这种方法记录测量数据，这种情况应使用科学记数法或用公制前缀，见例 1-20。

(e) 0.005 02 有三位有效数字，见规则 2 和 3。

相关问题：测量数值 10 和 10.0 有什么区别?

1.7.3　数字舍入

由于测量总含有一定的近似数，因此结果只能表示为有效数字加一位不确定数，其数字位数表示了测量的精度，基于此，需要将对数据进行舍入，舍弃一位或多位数字到最后一个有效数字的右边，仅由最高舍弃数位的大小来决定如何舍入。舍入规则如下：

1. 如果最高舍弃位数字大于 5，则最末保留位加 1。

2. 如果最高舍弃位数字小于 5，则最末保留位不变。

3. 如果最高舍弃位数字等于 5，则最末保留位为奇数加 1 成偶数，否则保持偶数不变，称为“舍入到偶数”。

【例 1-22】　舍入下列数据到三位有效数字。

(a) 10.071　　(b) 29.961　　(c) 6.3948　　(d) 123.52　　(e) 122.52

解：(a) 10.071 舍入为 10.1。

(b) 29.961 舍入为 30.0。

(c) 6.3948 舍入为 6.39。

(d) 123.52 舍入为 124。

(e) 122.52 舍入为 122。

相关问题：用舍入到偶数规则将 3.2850 舍入到三位有效数字。

在大多数电气、电子系统和电路中，元器件的公差大于 1%（通常为 5%和 10%），多数测量仪器的标称精度都比这要高，有些特殊的测量要求精度高于千分之一，为此，一般测量数据用三位有效数字表示比较合适。如果有多个中间结果，则在计算时保留所有数字，而在最后结果时舍入到三位有效数字。

本节测试题

1. 小数点右边显示零的规则是什么？
2. 什么是舍入到偶数规则？
3. 在电原理图上常常看到 1000Ω 电阻列为 1.0kΩ，这对于电阻值意味着什么？
4. 如果要将电源设置为 10.00V，这对所需测量仪器的准确性意味着什么？
5. 如何用科学记数法或工程记数法来正确表示测量数据的有效数字位数？

1.8 电气安全

电气系统工作中安全是一个需要关注的问题，触电或烧伤总是不可避免会发生的，因此始终应谨慎使用。当电压作用于身体的两个点时，人体就构成了一条电流通路从而产生触电。由于电气元件经常在高温中使用，当人接触这些元件时可能会灼伤皮肤。此外，还存在潜在的电气火灾危险。

学习完本节内容，应该能够

- 辨别电气危害，练习安全规程；
- 描述触电的原因；
- 列出人体电流通路；
- 讨论电流对人体的影响；
- 列出应遵守的用电安全预防措施。

1.8.1 触电

电流（不是电压）流经人体引起触电，当然，电压施加在电阻两端就会产生电流，当身体上某点接触电压而另一点接触不同的电压或地面时，如金属机箱，将有电流通过身体，电流的路径取决于电压跨接的两个点，由此产生触电的严重程度取决于电压大小和电流通过身体的路径。

电流通过身体的路径决定了哪些组织和器官将会受到影响。电流路径可以分为接触电压、跨步电压、接触/跨步电压三种，如图 1-10所示。

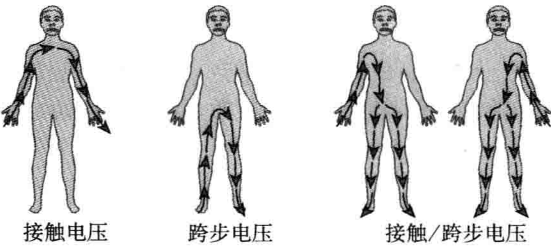


图 1-10 触电危险的三种基本电流路径

电流对人体的影响 电流的大小取决于电压和电阻，而人体电阻又受多个因素影响，包括体质、皮肤湿度、电压接触点等。表 1-4列出了各种电流毫安值对人体的影响。

表 1-4 电流的物理影响（其值取决于体质）

电流/mA	物理影响	电流/mA	物理影响
0.4	轻微的感觉	23	剧烈疼痛电击，肌肉收缩，呼吸困难
1.1	感觉的阈值	75	心室颤动，极限阈值
1.8	电击，无痛苦，不丧失肌肉控制	235	心室颤动，持续时间 5s 以上通常是致命的
9	痛苦的电击，仍没有丧失肌肉控制	4000	心脏麻痹（无心室颤动）
16	痛苦的电击，达到阈值	5000	组织烧伤

人体电阻 人体电阻的典型值在 10～50kΩ 之间，取决于两个测量点的位置，皮肤的潮湿程度也会影响人体两个点之间的电阻。人体电阻确定了产生表 1-4 所列影响所需的电压大小，例如，如果两个给定点之间的人体电阻为 10kΩ，90V 电压将产生足够的电流（9mA）造成痛苦的电击。

1.8.2 市电

一般情况下我们都会选择使用市电，但是市电可能会致命，因此，最好小心周围任何电压源（即使是低电压也可能造成严重烧伤）。作为一般规则，应避免任何带电操作，并用良好的仪表检查电源是否切断。大多数教学实验室中都使用低电压，但仍应避免触摸任何带电的电路。如果要操作连接到市电上的电路，线路必须断开，在设备或线路断开处贴出通知，并安装一个挂锁防止有人意外地接通电源，这一过程称为上锁/挂牌，广泛应用于工业，对于上锁/挂牌已有特定的 OSHA[㊀] 标准和工业标准。

大多数实验室设备连接到市电线路上（“ac”），在北美地区是 120Vrms[㊁]。故障的设备可能会引起“发热”致使电线不慎暴露，因此，应检查外露的电线和未封闭的设备或其他潜在的安全问题。家庭和电气实验室使用的单相市电线路使用三条绝缘的导线，分别标记为“相线”（黑色或红色线）、中性线（白线）和安全接地线（绿线）。相线和中性线中流过电流，而正常工作时绿色安全线应永远不会有电流。安全接地线连接到设备的金属外壳，并连接到房屋插座金属盒和管道上。图 1-11 指出了一个标准插座上这些导体的位置。注意，插座上的中性线插孔比相线插孔大。

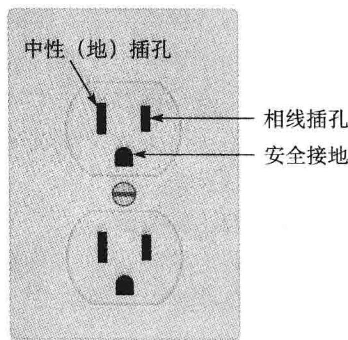


图 1-11　标准插座及其连接

配电面板上安全接地线应和中性线相连，仪器或装置的金属机箱也要与地面相连。当发生相线意外与地面接触的事故时，由此产生的大电流将使电路断路器跳闸或断开熔丝，避免出现危害。然而，如果接地线破损或缺失，没有人触碰将不会有大电流出现。为了防止这种危险，必须确保线路中的接地线不被破坏。

许多电路进一步用一个称为接地故障断路器（Ground-fault Circuit Interrupter，GFCI，有时简称 GFI）的特殊装置保护。如果 GFCI 电路发生故障，传感器检测到相线和中性线的电流不相等，电路断路器就会跳闸。GFCI 断路器是非常快的代理，可以在主面板上快于断路器跳闸。GFCI 断路器动作很快，能比主面板断路器更快速地跳闸。GFCI 断路器常用于存在触电危险的地方，如有水或潮湿的地方，水池、浴室、厨房、地下室和车库都应该安装 GFCI 插座。图 1-12 显示带有测试和复位按钮的接地故障插座，当按下测试按钮时，电路应能立即断开，按下复位按钮恢复电源。

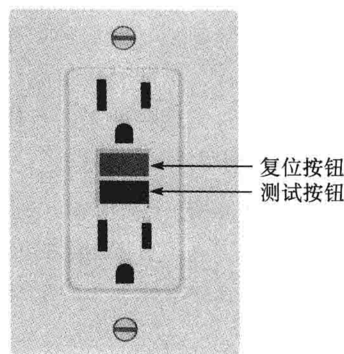


图 1-12　GFCI 插座

小贴士　插座测试仪是专为特定插座包括专用插座设计的，它能发现如断线、接线故障、极性接反等故障，用 LED 或霓虹灯指示结果，有些测试仪设计用于测试接地故障断路器（GFCI）是否正常。

1.8.3 安全注意事项

使用电气和电子设备时有以下重要的注意事项。

㊀ OSHA 为职业安全与健康标准。——译者注

㊁ rms——有效值，将在 8.2 节介绍，我国市电电压为 220Vrms。——译者注

- 避免接触任何电压源，进行必须触摸电路部分的工作之前要先关闭电源。
- 不单独工作，应有可用于紧急情况的电话。
- 不疲劳工作，不在服用使人昏昏欲睡的药物后工作。
- 进行电路工作时不戴戒指、手表及其他金属饰品。
- 不操作不熟悉的设备，除非知道正确的程序并清楚潜在的危险。
- 确保电源线状态良好，接地插针未缺失或弯曲。
- 妥善保养工具，确保金属工具手柄上的绝缘状态良好。
- 正确使用工具并保持工作区域整洁。
- 适当的时候戴上安全眼镜，特别是当焊接、裁剪线或用电动工具时。
- 用手触摸电路的任何部分前必须将电源关闭并对电容器放电。
- 知道紧急关闭电源开关和紧急出口的位置。
- 切勿试图废除或篡改安全装置，如联锁开关或三脚插头的接地引脚。
- 穿鞋并保持干燥，在电气回路上工作时勿站立在金属或潮湿的地板上。
- 不用湿手操作仪器。
- 绝不假设电路处于关闭状态，工作之前用可靠的仪表做仔细检查。
- 在电子电源上设置限流器以防止流入测试电路的电流过大。
- 某些设备（如电容器）可以在电源移去后长时间存储可以致命的电荷，工作之前必须对它们正确地放电。
- 电路连接时，总是将连接到最高电压的点作为最后一步。
- 避免接触电源的端子。
- 务必使用绝缘电线和带绝缘罩的连接器或接线夹。
- 保持电缆和电线尽可能短，正确连接各极。
- 及时报告任何不安全状况。
- 熟悉并遵守所有的工作场所和实验室规则，不在设备附近饮食。
- 若有人不能脱离带电导体，应立即关掉电源；如果不能断电，应使用任何可用的不导电材料尝试将该人的身体和导体分开。
- 使用上锁/挂牌程序，以避免有人在你工作时打开电源。

安全提示 GFCI插座并不能在所有情况下防止触电或人身伤害。如果你是触摸相线和中性线而没有接地，则检测不到接地故障，GFCI断路器不会跳闸。另一种情况是，GFCI虽然可以防止触电，但却不能防止它中断电路前的初始电击，初始电击可能会导致继发性损伤，如摔倒。

本节测试题

1. 与电接触时是什么原因导致身体疼痛和/或对身体的损害？
2. 在电气线路上工作时能戴戒指（T或F)。
3. 带电工作时站在湿地板上没有安全危害（T或F)。
4. 如果自己小心就能在不断电的情况下重新给电路接线(T或F)。
5. 触电是非常痛苦的，甚至是致命的（T或F)。
6. 什么是GFCI?

本章小结

- 新产品的设计步骤包括使用电路设计软件仿真、计算机布局布线、样机制作和测试。

- 很多公司往往从纵向组织（从原材料到成品都在一个工厂完成）转向横向组织（专注于某一专长）。
- 电子工业可分为制造部门和服务部门。
- 许多技术服务部门的工作也需要广泛的技能，包括与电气电子和机械装置相关的技能。
- 系统是一组执行特定功能的相互关联部件的组合，由边界把它与环境隔离开来，系统通过输入和输出与外界进行通信。
- 方框图是系统的一种模型，以图形表示系统的结构，用标记的块表示各个功能，而用连线表示信号流。
- 传输曲线是系统或电路输入、输出比例的图示。
- 电气和电子电路必须有完整的路径、一个或多个电源和负载。电气和电子电路含有无源元件和有源元件两种元件。
- 无源元件不能增加信号功率；而有源元件可以增加信号功率。
- 离散信号称为数字信号；连续变化的信号称为模拟信号。
- 传感器是一种能将能量从一种形式转换到另一种形式的器件。
- 科学记数法是一种表示极大数和极小数的方法，用1～10之间的数字（小数点左边一位数字）乘以一个10的乘方。
- 工程记数法是一种形式的科学记数方法，用小数点左边一位、两位或三位的数字与指数为3的倍数的10的乘方相乘来表示一个量。
- 公制前缀是用来表示指数为3的倍数的10的乘方符号。
- 测量数据的不确定性取决于测量的准确性和精度。
- 数学运算结果的有效数字位数不应该超过原数据的有效数字位数。
- 电气插头的标准连接包括相线、中性线和安全接地线。
- GFCI断路器感知相线与中性线的电流，如果它们不同，指示接地故障并跳闸。

关键术语

准确度（Accuracy） 测量误差的范围的度量。

有源元件（Active component） 需要施加电源才能正常工作的一种元件，有源元件可以提供比输入信号更大功率的信号输出。

交流发电机（Alternator） 交流电发生器，交流发电机将机械能转换为电能。

模拟（Analog）信号 连续的信号。

方框图（Block diagram） 以图形方式表示的一种系统结构模型，用标记的块来表示功能，用线条表示信号流。

边界（Boundary） 系统和环境之间的分界线。

电路（Circuit） 由用来产生期望结果的电气元件互联构成。

数字（Digital）信号 数值已离散化的信号。

触电（Electrical shock） 电流通过人体而引起的身体感觉。

工程记数法（Engineering notation） 将任意数据表示为一、两或三位数与指数为3的倍数的10的乘方相乘的一种记数系统。

误差（Error） 真值或最可接受值（实际值）与测量值之间的差。

指数（Exponent） 按某个基数增长的数值。

增益（Gain） 放大器输出与输入的比。

横向组织（Horizontal organization） 一种分散的业务结构，使管理人员专注特长并简化决策。

输入（Input） 施加于电路并得到期望的结果的电压、电流或功率。

集成电路（Integrated circuit） 由电阻、晶体管和其他元件组成并制作在一个单元上的复杂有源电路，能够完成多种离散元件的功能。

机电一体化（Mechatronics） 机械和电子的协同组合，包括仪表和控制系统。

公制前缀（Metric prefix） 在工程记数法中用来替换10的乘方的符号。

振荡器（Oscillator） 内部能生成输出信号的电路，输出的连续信号可以是多种不同的连续信号。

输出（Output） 系统对输入信号处理后所得的结果。

无源元件（Passive component） 无需电源的元件，无源元件不能增加信号功率。

十的乘方（Power of ten） 用基10及其指数的数值表达方式，将数据提高一个10的幂次。

精度（Precision） 一系列测量结果的重复性（或一致性）的度量。

舍入（Round off） 在数据中对有效数字右边一位或多位数字进行截断处理的过程。

科学记数法（Scientific notation） 用1～10之间的一个数与10的乘方相乘来表示数据的系统。

SI国际实用单位制 用于所有工程和科学研究的

国际标准单位系统，是法文 Le Systeme International d'Unites 的缩写。

有效数字（Significant digit） 数据中已知是正确的数字。

系统（System） 完成特定功能的相互关联部件的组合。

传感器（Transducer） 将能量从一种形式转换到另一种形式的器件。

传输曲线（Transfer curve） 表示输出与输入比例关系的图形。

纵向组织（Vertical organization） 一种自上而下的集中的业务结构，目前趋势是走向专业化。

是非测验题

1. 纵向组织的特点是分散决策。
2. 从事服务和维修工作的技术人员通常需要识别并更换有故障的组件。
3. 机电一体化技术是一门应用工程分类，它是机械与电子的协同组合。
4. 系统是不可能与环境完全隔离的。
5. 方框图和流程图是一样的。
6. 传输曲线上输入和输出必须用相同的单位。
7. 无源元件没有功率增益。
8. 扬声器是传感器的例子。
9. 在科学记数法和工程记数法中，数据 3300 均写成 3.3×10^3。
10. 科学记数法中，表示负数的指数总是负的。
11. 以科学记数法表示的两个数相乘，它们的指数必须相同。
12. 以科学记数法表示的两个数相除，分子指数减去分母指数。
13. 公制前缀微（micro）等价于 10 的乘方 10^6。
14. 用公制前缀表示 56×10^6，结果是 56M。
15. 0.047μF 等于 47nF。
16. 0.0102 的有效数字位数是 3。
17. 用舍入到偶数规则将 26.25 舍入到三位数字，结果是 26.3。
18. 交流电的白色中性线必须与相线电流相同。

自测题

1. PLC 是
   (a) 印制逻辑电路
   (b) 功率限制电路
   (c) 可编程序逻辑控制器
   (d) 峰值限制控制器
2. 系统边界作下列分隔
   (a) 分割输入与输出
   (b) 分割系统与环境
   (c) 仅仅分割输入与环境
   (d) 仅仅分割输出与环境
3. 对于系统而言，方框图是表示下列内容的图形工具
   (a) 功能与信号流程
   (b) 系统细节
   (c) 电源
   (d) 逻辑过程
4. 传输曲线总是
   (a) 一条直线
   (b) 输出对输入的比
   (c) 无量纲的
   (d) 上述全正确
5. 有源元件是一种如下描述的器件
   (a) 自供电
   (b) 向其他元件供电
   (c) 没有输出
   (d) 能够增加信号功率
6. 交流电源的例子是
   (a) 电池
   (b) 交流发电机
   (c) 太阳电池
   (d) 燃料电池
7. 数据 4.7×10^3 等同于
   (a) 470
   (b) 4700
   (c) 47 000
   (d) 0.0047
8. 数据 56×10^{-3} 等同于
   (a) 0.056
   (b) 0.560
   (c) 560
   (d) 56 000
9. 数据 3 300 000 可以用工程记数法表示为
   (a) 3300×10^3
   (b) 3.3×10^{-6}
   (c) 3.3×10^6

(d) a 或 c

10. 十毫安可表示为
   (a) 10MA
   (b) 10μA
   (c) 10kA
   (d) 10mA
11. 五千伏特可表示为
   (a) 5000V
   (b) 5MV
   (c) 5kV
   (d) a 或 c
12. 二千万欧姆可表示为
   (a) 20mΩ
   (b) 20MW
   (c) 20MΩ
   (d) 20μΩ
13. 15 000W 等同于
   (a) 15mW
   (b) 15kW
   (c) 15MW
   (d) 15μW
14. 下列哪些不是电气物理量
   (a) 电流
   (b) 电压
   (c) 时间
   (d) 功率
15. 电流的单位是
   (a) 伏特
   (b) 瓦特
   (c) 安培
   (d) 焦耳
16. 电压的单位是
   (a) 欧姆
   (b) 瓦特
   (c) 伏特
   (d) 法拉
17. 电阻的单位是
   (a) 安培
   (b) 亨利
   (c) 赫兹
   (d) 欧姆
18. 赫兹是下列哪个物理量的单位
   (a) 功率
   (b) 电感
   (c) 频率
   (d) 时间
19. 数据 0.1050 的有效数字位数是
   (a) 二
   (b) 三
   (c) 四
   (d) 五

习题㊀

基本习题

1.1 节

1. 如果工程师有一个改进电路板的想法，实施改变前应采取什么措施？
2. 给出系统制造商制造产品的例子。
3. 给出技术人员的故障诊断和维修工作从元件级别向系统方法转化的根本原因。

1.2 节

4. 电气系统和电子系统之间的主要区别是什么？
5. 将模拟信号转换成数字信号的两个优点是什么？
6. 方框图和流程图之间的主要区别是什么？

1.3 节

7. (a) 什么是振荡器？
   (b) 它与大多数电路有何不同？
8. (a) 首字母英文缩写 HVDC 表示什么？
   (b) 用在哪里？
9. 什么是载波？
10. 一个器件的传输函数为其输出与输入的比例关系图，那么 ADC 的传输函数是什么？

1.4 节

11. 用科学记数法表示下列各数。
   (a) 3000
   (b) 75 000
   (c) 2 000 000
12. 用科学记数法表示下列各分数。
   (a) 1/500
   (b) 1/2000
   (c) 1/5 000 000
13. 用科学记数法表示下列各数。
   (a) 8400
   (b) 99 000
   (c) 0.2×10^6

㊀ 全书每章奇数习题的答案列在书末。

14. 用科学记数法表示下列各数。
   (a) 0.0002
   (b) 0.6
   (c) 7.8×10^{-2}
15. 用常规十进制表示下列各数。
   (a) 2.5×10^{-6}
   (b) 5.0×10^{2}
   (c) 3.9×10^{-1}
16. 用常规十进制表示下列各数。
   (a) 4.5×10^{-6}
   (b) 8×10^{-9}
   (c) 4.0×10^{-12}
17. 计算下列加法。
   (a) $(9.2\times10^{6})+(3.4\times10^{7})$
   (b) $(5\times10^{3})+(8.5\times10^{-1})$
   (c) $(5.6\times10^{-8})+(4.6\times10^{-9})$
18. 计算下列减法。
   (a) $(3.2\times10^{12})-(1.1\times10^{12})$
   (b) $(2.6\times10^{8})-(1.3\times10^{7})$
   (c) $(1.5\times10^{-12})-(8\times10^{-13})$
19. 计算下列乘法。
   (a) $(5\times10^{3})\times(4\times10^{5})$
   (b) $(1.2\times10^{12})\times(3\times10^{2})$
   (c) $(2.2\times10^{-9})\times(7\times10^{-6})$
20. 计算下列除法。
   (a) $(1.0\times10^{3})\div(2.5\times10^{2})$
   (b) $(2.5\times10^{-6})\div(5.0\times10^{-8})$
   (c) $(4.2\times10^{8})\div(2\times10^{-5})$
21. 用工程记数法表示下列各数。
   (a) 89 000
   (b) 450 000
   (c) 12 040 000 000 000
22. 用工程记数法表示下列各数。
   (a) 2.35×10^{5}
   (b) 7.32×10^{7}
   (c) 1.333×10^{9}
23. 用工程记数法表示下列各数。
   (a) 0.000 345
   (b) 0.025
   (c) 0.000 000 001 29
24. 用工程记数法表示下列各数。
   (a) 9.81×10^{-3}
   (b) 4.82×10^{-4}
   (c) 4.38×10^{-7}
25. 计算下列加法，并用工程记数法表示结果。
   (a) $2.5\times10^{-3}+4.6\times10^{-3}$
   (b) $68\times10^{6}+33\times10^{6}$
   (c) $1.25\times10^{6}+250\times10^{3}$
26. 计算下列乘法，并用工程记数法表示结果。
   (a) $(32\times10^{-3})\times(56\times10^{3})$
   (b) $(1.2\times10^{-6})\times(1.2\times10^{-6})$
   (c) $100\times(55\times10^{-3})$
27. 计算下列除法，并用工程记数法表示结果。
   (a) $50\div(2.2\times10^{3})$
   (b) $(5\times10^{3})\div(25\times10^{-6})$
   (c) $(560\times10^{3})\div(660\times10^{3})$

1.5 节

28. 使用公制前缀表示习题 11 中的各个数的欧姆值。
29. 使用公制前缀表示习题 13 中的各个数的安培值。
30. 使用公制前缀表示下列各量。
   (a) 31×10^{-3} A
   (b) 5.5×10^{3} V
   (c) 20×10^{-12} F
31. 使用公制前缀表示下列各量。
   (a) 3×10^{-6} F
   (b) $3.3\times10^{6}\,\Omega$
   (c) 350×10^{-9} A
32. 使用 10 的乘方表示下列各量。
   (a) 5μA
   (b) 43mV
   (c) 275kΩ
   (d) 10MW

1.6 节

33. 完成下列指定的转换。
   (a) 将 5mA 转换为微安
   (b) 将 3200μW 转换为毫瓦
   (c) 将 5000kV 转换为兆伏
   (d) 将 10MW 转换为千瓦
34. 确定下列各数。
   (a) 1 毫安的微安数
   (b) 0.05 千伏的毫伏数
   (c) 0.02 千欧的兆欧数
   (d) 155 毫瓦的千瓦数
35. 计算下列加法。
   (a) 50mA+680μA
   (b) 120kΩ+2.2MΩ
   (c) 0.02μF+3 300pF
36. 完成下列运算。
   (a) 10kΩ÷(2.2kΩ+10kΩ)

(b) $250\text{mV} \div 50\mu\text{V}$

(c) $1\text{MW} \div 2\text{kW}$

1.7节

37. 下列各数有几位有效数字？

(a) 1.00×10^3

(b) 0.0057

(c) 1502.0

(d) 0.000 036

(b) 0.105

(c) 2.6×10^2

38. 使用“舍入到偶数”规则将下列各数截尾成三位有效数字。

(a) 50 505

(b) 220.45

(c) 4646

(d) 10.99

(e) 1.005

各节测试题答案

1.1节

1. 仿真软件可以最小的成本对一个电路进行优化，它能找电路潜在的问题，如时序、噪声或热的问题。
2. 制造业和服务业。
3. 通信、计算机、可再生能源、工业控制、消费产品、医疗设备、交通运输、安防。
4. 认证让每个人能展示他们的技能，也为雇主提供一种判断个人能力的手段。

1.2节

1. 数字温度计从周围环境提取热能，所以其输入为热，输出是显示的温度。
2. 国际空间站的环境包括地球与绕地球运动物质的引力场以及来自太阳的辐射热和光。
3. 方框图表示了各功能块的关系及信号的流通路径。
4. 传输曲线是输出与输入比例关系的图形表示。

1.3节

1. 无源元件工作不需要电源供电但不增加信号功率，有源元件工作需要适当的电源才能正常工作，并可以增加信号功率。
2. 电池只能提供电能，不能增加信号功率。
3. 50Hz和60Hz。
4. 一般由有源元件将直流电能转换成信号功率。
5. 数字电路是处理离散信号的电路，模拟电路是处理连续信号的电路。
6. 传感器是一种将能量从一种形式转化为另一种形式的器件。

1.4节

1. T。
2. 10^2
3. (a) 4.35×10^3
   (b) 1.201×10^4
   (c) 2.9×10^7
4. (a) 7.6×10^{-1}
   (b) 2.5×10^{-4}
   (c) 5.97×10^{-7}
5. (a) 3×10^5
   (b) 6×10^{10}
   (c) 2×10^1
   (d) 2.37×10^{-6}
6. 输入数字，按下EE键，然后输入10的幂次。
7. (a) 5.6×10^{-3}
   (b) 28.3×10^{-9}
   (c) 950×10^3
   (d) 375×10^9
8. 输入数字，按下EE键，然后输入10的幂次。

1.5节

1. 兆（M）、千（k）、毫（m）、微（μ）、纳（n）、皮（p）
2. $1\mu\text{A}$（1微安）
3. 250kW（250千瓦）

1.6节

1. 0.01MV=10kV
2. 250 000pA=0.000 25mA
3. 125kW
4. 75mV

1.7节

1. 小数点右边的零只当它们是有效数字时才保留。
2. 如果被截断的数是5，若保留的最后一位数字是奇数则加1成偶数，如果本身是偶数则不变。
3. 小数点右边的一个零表示电阻值的精度为近似100Ω（0.1kΩ）。
4. 该仪器必须准确到四位有效数字。
5. 科学记数法和工程记数法可以表示小数点右边任意位数字。小数点右边的数字都被认为是有效数字。

1.8节

1. 电流

2. F
3. F
4. F
5. T
6. 接地故障断路器

例题中相关问题答案

1-1 7.5×10^{8}
1-2 9.3×10^{-7}
1-3 820 000 000
1-4 4.89×10^{3}
1-5 1.85×10^{-5}
1-6 4.8×10^{5}
1-7 4×10^{4}
1-8 输入5.739 46，按下EE键，再输入5。
1-9 36×10^{9}
1-10 5.6×10^{-12}
1-11 输入273.9，按下EE键，再输入3。
1-12 (a) 56MΩ (b) 470μA
1-13 1000μA
1-14 1mV
1-15 0.893μA
1-16 0.01μF
1-17 2200 pF
1-18 0.0022MΩ
1-19 2883mA
1-20 10.0×10^{3}
1-21 数10有两位有效数字，数10.0具有三位有效数字。
1-22 3.28

是非测验题答案

1. F 2. F 3. T 4. T 5. F 6. F 7. T 8. T 9. T 10. F 11. F 12. T 13. F 14. T 15. T 16. T 17. F 18. T

自测题答案

1. (c) 2. (b) 3. (a) 4. (b) 5. (d) 6. (b) 7. (b) 8. (a) 9. (c) 10. (d) 11. (d) 12. (c) 13. (b) 14. (c) 15. (c) 16. (c) 17. (d) 18. (c) 19. (c)

第2章
电压、电流与电阻

本章目标

- 描述原子的基本结构
- 介绍电荷的概念
- 定义电压并讨论其特性
- 定义电流并讨论其特性
- 定义电阻并讨论其特性
- 描述一个基本的电路
- 进行基本的电路测量

本章介绍三种基本电气量——电压，电流和电阻，无论什么类型的电气或电子系统，这几个物理量都是最重要的，交流电路和直流电路也是如此，本书第一部分我们将重点讨论直流电路。由于交流电路在电气系统中的重要性，可能会偶尔使用交流电路来说明某些特定的概念，但是，在这些特殊情况下，电路的分析和计算与等效的直流电路是相同的。

为了帮助理解电压、电流、电阻，本章首先讨论基本的原子结构，并引入电荷的概念，然后研究基本的电路以及电压、电流和电阻的测量技术。

2.1 原子

所有物质都是由原子构成的，而所有原子都由电子、质子和中子组成，原子中某些电子的配置是决定导电或半导电材料传导电流能力的关键因素。

学习完本节内容，应该能够

- 描述原子的基本结构；
- 定义原子核、质子、中子和电子；
- 定义原子序数；
- 定义原子层；
- 解释什么是价电子；
- 描述电离；
- 解释什么是自由电子；
- 定义导体、半导体和绝缘体。

原子是保留元素特征的最小粒子。已知的118个元素的原子都各不相同，每个元素均具有独特的原子结构。根据经典的玻尔（Bohr）模型，原子被形象化认为具有行星结构，电子沿轨道围绕中心原子核运动，如图2-1所示。原子核由带正电的质子和不带电的中子组成，带负电荷的基本粒子称为电子，电子沿轨道绕原子核运动。

每个类型的原子都具有一定数目的质子以区别于其他元素的原子。例如，最简单的原子是氢，含有一个质子和一个电子，如图2-2a所示。另一个例子是氦原子，如图2-2b所示，原子核有两个质子和两个中子，还有两个电子绕原子核沿轨道运行。

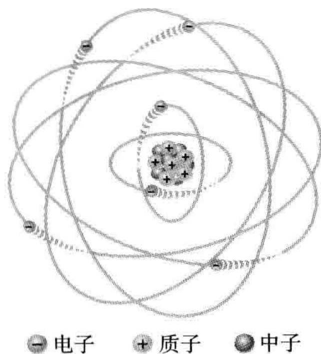


图 2-1 表示电子沿轨道围绕原子核运动的玻尔模型。图中电子的“尾巴”表示其正在运动

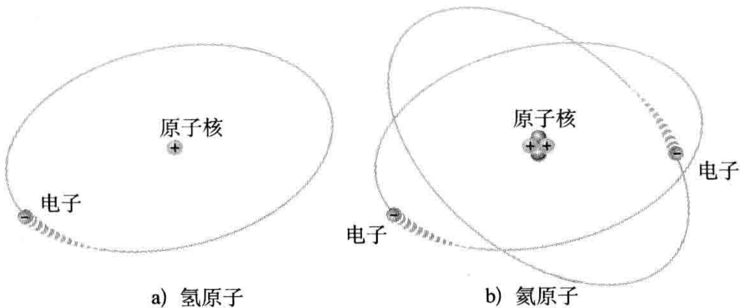


图 2-2 两种最简单的原子：氢和氦

2.1.1 原子序数

元素周期表中，所有元素均按照其*原子序数*排列，原子序数等于原子核内质子的数目，例如，氢的原子序数为 1，而氦的原子序数为 2。在正常状态（或中性），给定元素的所有原子所具有的电子数与质子数相同，从而正电荷与负电荷相抵消，原子的净电荷为零，从而保持电平衡。

2.1.2 电子层和轨道

原子中的电子在距离原子核一定距离的轨道上运动，靠近原子核的轨道上的电子能量较少，而离原子核远的轨道上的电子能量较多。我们知道，在原子结构中电子所具有的能量值是离散（分离且不同）的。因此，电子只能围绕原子核在离散的轨道上运动。

能级　距原子核的每个离散距离（轨道）对应于一定的能级，原子中轨道按能带被分组为*层*（shell），给定的原子具有固定数量的层，每个层在允许的能级（轨道）上具有固定的最大电子数。层被标记为 1，2，3 等，第一层最接近原子核。能带的内容如图 2-3 所示，图中显示了两个能级，其他类型的原子可能存在另外的层，这取决于元素。

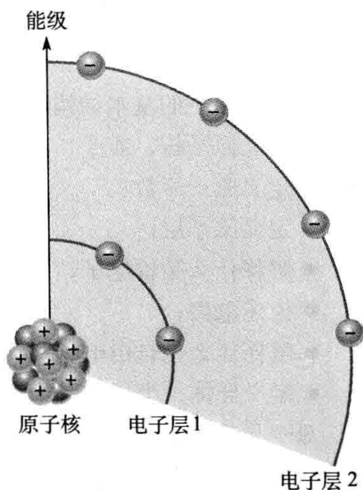


图 2-3 能级随着与原子核距离的增大而增大

每层的最大电子数可由公式 $2N^2$ 计算得到，其中 N 是电子的层数。因此，任何原子的第一层（$N=1$）最多可以有 2 个电子，第二层（$N=2$）最多有 8 个电子，第三层最多有 18 个电子，第四层最多有 32 个电子。许多元素在第三层填充了 8 个电子后就开始在第四层填充电子。

2.1.3 价电子

远离原子核的轨道上的电子具有更高的能量，因而就比那些靠近原子核的电子受束缚小，这是因为带正电荷的原子核和带负电荷的电子之间的吸引力随着电子与原子核距离的增大而减小。具有最高能级的电子处于原子的最外层，受原子的束缚相对较小，因此最外层被称为价电

子层，价电子层中的电子称为价电子。价电子影响着材料结构内的化学反应和键合，也决定着材料的电性能。

2.1.4　自由电子和离子

如果电子吸收足够能量的光子，电子将挣脱原子的束缚成为自由电子，而剩下的原子或原子团带净电荷，这样的原子或原子团称为离子。当电子从中立的氢原子（记为 H）逸出，留下带正净电荷的原子，成为正离子（记为 H^+）。另一种情况是，原子或原子团获取了一个或多个电子，表现为带有负净电荷，这样的原子或原子团称为负离子。

2.1.5　铜原子

铜是电气系统中最常用的金属，铜原子有 29 个电子，在四层轨道上围绕原子核运动，如图 2-4 所示。注意，在第四层或最外层即价电子层只有一个价电子，内层被称为核心。当铜原子最外层的价电子获得足够的热能，它就可以从父原子挣脱，成为自由电子。在室温下，一片铜中存在着这些自由电子的“海洋”，自由电子不绑定到任一个特定的原子，但是可以在铜材料中自由移动，大量存在的自由电子使铜成为良导体，可以流过电流。

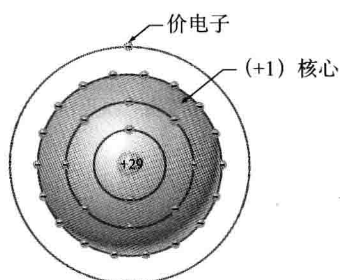


图 2-4　铜原子

2.1.6　材料的分类

电子学中将材料分为三类：导体、半导体和绝缘体。

导体　导体为电流容易通过的材料。导体中存在有大量的自由电子，其结构特征是含有 1～3 个价电子。大多数金属都是良导体，银是最好的导体，铜次之。由于铜比银更便宜，因此，铜是使用最广泛的导电材料，铜线常被用做电路中的导体。

半导体　半导体的导电能力在导体之下，因为它比导体拥有的自由电子少。半导体的原子结构有四个价电子。然而，由于其独特的特性，某些半导体材料是电子器件的基础，如二极管、晶体管和集成电路。硅和锗是常见的半导体材料。

绝缘体　绝缘体是非金属材料，电流的不良导体，用于在不希望电流流通的地方阻止电流。在绝缘体的原子结构中没有自由电子，价电子全部被束缚在原子核上，不被认为是“自由的”。虽然非金属元素通常被认为是绝缘体，但是在电气和电子系统中采用的最实用的绝缘体一般是化合物，如玻璃、陶瓷、聚四氟乙烯和聚乙烯等。

本节测试题

1. 什么是基本的负电荷粒子？
2. 给出原子的定义。
3. 原子由什么组成？
4. 给出原子序数的定义。
5. 所有的元素都具有同类型的原子吗？
6. 什么是自由电子？
7. 原子结构中的电子层是什么？
8. 给出两种导电材料的名称。

2.2　电荷

我们知道，电子是最小的带负电荷的粒子。当材料中的电子过剩时，就会表现出净的负电荷，而当材料中电子缺乏时，则表现出净的正电荷。

学习完本节内容，应该能够

- 解释什么是电荷；
- 明确电荷单位的名称；
- 给出各种电荷的名称；
- 描述电荷之间的作用力；
- 确定给定数量电子的电荷量。

一个电子所带的电荷与一个质子所带的电荷等量但符号相反。电荷是物质中电子过剩或缺乏的电特性。电荷用符号Q表示。静电就是材料中存在净正电荷或负电荷，每个人都有过静电的经历。例如，当试图触摸金属表面或另一个人时，或烘干机中的衣服紧贴在一起时就会有静电。

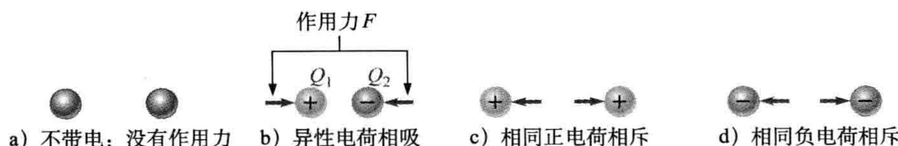


图 2-5 电荷的吸引与排斥

带有相反极性电荷的材料相互吸引，而带有相同极性电荷的材料互相排斥，如图 2-5 所示。电荷之间的作用力表现为吸引或排斥，这种力称为电场，由看不见的“力线”组成，如图 2-6 所示。

库仑定律：两个点电荷（Q_1，Q_2）之间的作用力（F）与两个点电荷的电荷量的乘积成正比，与两个点电荷之间距离（d）的平方成反比。

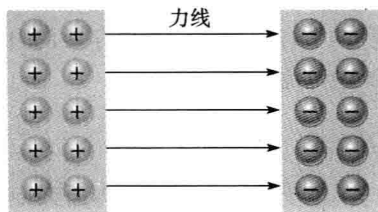


图 2-6 相反极性电荷表面之间的电场

2.2.1 电荷的单位

电荷的测量单位为库仑，符号为 C。

1 库仑电荷量等于 6.25×10^{18} 个电子所带电荷量的总和。

单个电子的电荷量为 1.6×10^{-19}C，因此，对于给定数量的电子，以库仑来表示所带的总电荷量可用下式计算：

$$Q=\frac{电子数}{6.25\times10^{18}\ 电子/C} \tag{2-1}$$

2.2.2 正电荷与负电荷

考虑一个中性原子，也就是说原子中具有相同数目的电子和质子，因此该原子不带净电荷。当原子中的价电子通过施加能量被拉离原子时，将在原子中留下净正电荷（质子比电子多）成为正离子。正离子定义为带有净正电荷的原子或原子团。如果原子在其最外层获得额外的电子，它将带有净负电荷成为负离子。负离子定义为带有净负电荷的原子或原子团。

价电子逸出所需要的能量与原子最外层中的电子数有关。一个原子最多可以有 8 个价电子，外层电子数越完整，原子越稳定，因而移动一个电子就需要更多的能量。图 2-7 显示了一个正离子和一个负离子的创建过程。一个氢原子将其唯一的价电子贡献给氯原子，两者结合形成气态氯化氢（HCl），当气态 HCl 溶解在水中时将形成盐酸。

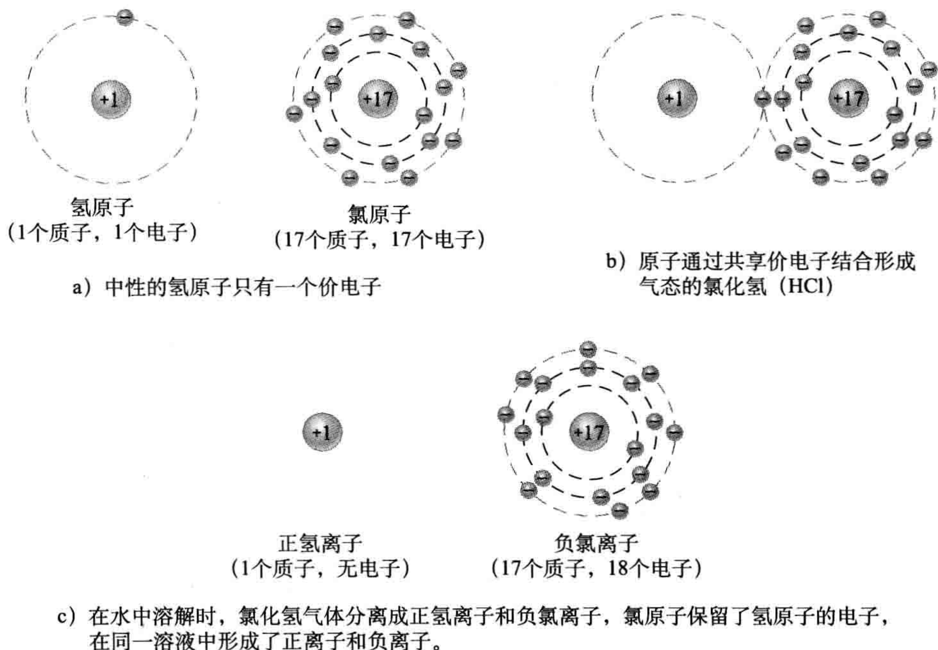


图 2-7　正负离子形成举例

【例 2-1】　试问 93.8×10^{16} 个电子共有多少库仑电荷？

解：

$$Q=\frac{\text{电子数}}{6.25\times10^{18}\ \text{电子}/\text{C}}=\frac{93.8\times10^{16}\ \text{电子}}{6.25\times10^{18}\ \text{电子}/\text{C}}=15\times10^{-2}=0.15\text{C}$$

相关问题：试问多少电子带有 3C 电荷？

本节测试题

1. 电荷用什么符号表示？
2. 电荷的单位是什么？用什么符号表示？
3. 电荷有哪两种类型？
4. 试问 10×10^{12} 个电子带有多少库仑电荷？

2.3　电压

如前所述，正负电荷之间存在吸引力，必须施加一定能量做功以克服电荷之间的作用力才能将电荷分开。所有分离的相反极性电荷都具有一定势能，电荷势能的差值称为电位差或电压。电压是电路的驱动力，也是产生电流的驱动力。

学习完本节内容，应该能够

- 给出电压的定义并讨论其特性；
- 写出电压的公式；
- 给出电压单位的定义和名称；
- 描述基本电压源。

电压定义为单位电荷的能量，记为

$$V=\frac{W}{Q}\tag{2-2}$$

式中，V 是电压，单位为伏特（V）；W 是能量，单位为焦耳（J）；Q 是电荷，单位为库仑

(C)。做一个简单的比喻，电压可被认为是封闭水系统中由泵产生的压差，压差驱动水在管道中流动。

2.3.1 电压的单位

电压的单位是伏特，用符号 V 表示。

若将 1C 电荷从一点移动到另一点需要 1J 能量，则这两点之间的电位差（电压）为 1V。

【例 2-2】 如果移动 10C 电荷需要 50J 能量，则电压为多大？

解：

$$V = \frac{W}{Q} = \frac{50\text{J}}{10\text{C}} = 5\text{V}$$

相关问题：将 50C 电荷从电路中一点移动到另一点，当两点之间的电压为 12V 时需要多少能量？

2.3.2 直流电压源

电压源对外提供电能，或提供电动势（emf，通常称为电压）。电压通过化学能、光能、磁能及机械运动产生。

理想直流（DC）电压源 不管电流多大，理想直流电压源都能对电路提供恒定的电压。虽然真正的理想电压源并不存在，但是实际电压源可以很接近理想电压源，因此，下面除非有特别说明，我们都认为电压源是理想的。

电压源可以是直流，也可以是交流，直流电压源的一般符号如图 2-8 所示。

理想直流电压源的电流与电压的关系如图 2-9 所示。从图中可以看出，对于任意电流，电压都是恒定的。对于一个连接在电路中实际（非理想）的电压源，随着电流的增加电压略有降低，如图中虚线所示。当有负载接到电压源时，如接电阻，将有电流从电压源流出。

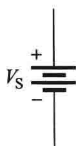


图 2-8 直流电压源的符号

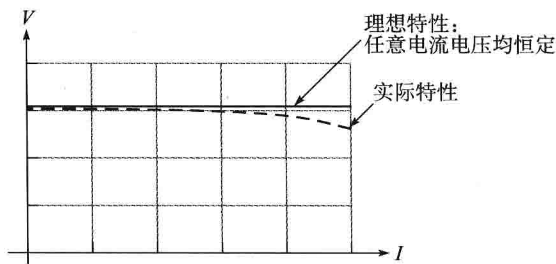


图 2-9 电压源特性图

2.3.3 直流电压源的种类

电池 电池是一种类型的电压源，它由将化学能直接转换成电能的一个或多个单元组成。我们知道，单位电荷的功（或能量）是电压的基本单位，也就是电池对单位电荷所增加的能量。其实说“对电池充电”并不恰当，因为电池并没有存储电荷，而是存储化学势能。所有电池应用一种称为氧化还原反应的特定化学反应，在这种化学反应中，电子从一个反应物转移到另一个反应物，如果反应中使用的化学品是分开的，则能够使电子在外部电路中移动形成电流。只要存在电子运动的外部路径，那么这个化学反应就可以继续下去，将存储的化学能转换为电流。如果路径被断开，则反应停止，这时称电池处于平衡状态。在电池中，提供电子端有剩余的电子，称为负极或阳极，获取电子的电极具有正电位，称为

阴极。

图 2-10 给出了一个不可充电的单芯铜-锌电池结构，以说明电池的工作原理。铜-锌电池构造简单，能说明所有不可充电电池的共同概念。将一个锌电极和一个铜电极分别浸入硫酸锌（$ZnSO_4$）和硫酸铜（$CuSO_4$）溶液中，为了防止铜离子 Cu^{2+} 与金属锌直接反应，用盐桥将两个溶液隔开，锌金属电极向溶液提供锌离子 Zn^{2+}，同时向外部电路提供电子，因此，随着反应的进行，这种电极将不断被蚕食。盐桥的存在使得正负离子可以通过它移动，以维持溶液中电荷的平衡。溶液中没有自由电子，由电流表（本例）或其他负载构成电子运动的外部路径。在阴极侧，锌释放出的电子与溶液中的铜离子结合形成金属铜，并在铜电极上沉积。化学反应在电极上发生（如图中所示）。虽然不同类型的电池有不同的反应，但是伴随着电池放电，都包括了电子从外部电路传输而离子在内部迁移。

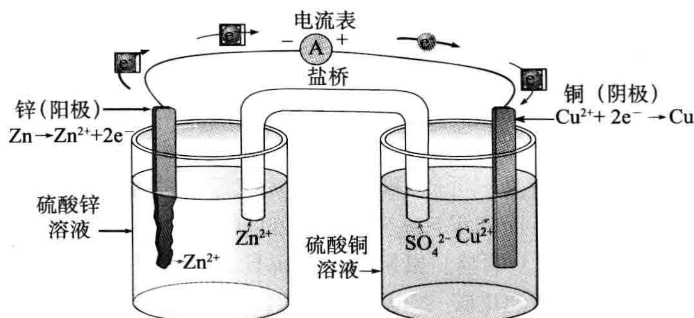


图 2-10　铜-锌电池，仅在为电子提供外部路径时发生反应，随着反应的进行，锌阳极被蚕食，Cu^{2+} 离子与电子结合在阴极上形成金属铜

单芯电池具有一定的固定电压，铜-锌电池的电压为 1.1V，汽车电池中使用的铅-酸蓄电池阳极和阴极之间电位差约 2.1V，典型的汽车电池由 6 个这样的电池串联而成。任何电池的电压取决于电池的化学特性，镍-镉电池的电压约为 1.2 V，根据第二反应物的不同锂电池电压可高达 4V。电池的化学性质也决定了电池的寿命和放电特性，例如，典型的锂-MnO_2 电池的使用寿命是碳-锌电池的 5 倍。

虽然电池芯的电压是由其化学特性确定的固定值，但其容量却是可变的，这取决于电池芯中材料的量。从本质上讲，电池芯的容量就是能从中获得的电子数，可以通过整个时间段电池芯对外提供的电流量（在 2.4 节中定义）来测得。

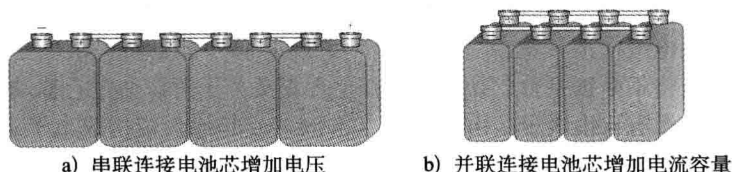
安全提示　铅酸电池可能有潜在的危险，因为硫酸具有高度腐蚀性，而电池的气体（主要是氢）具有爆炸性。如果接触到眼睛，电池中的酸会对眼睛造成严重伤害，也可能引起皮肤灼伤或毁坏服装。因此，操作电池或在电池附近工作时，必须佩戴防护眼镜，处理电池后必须仔细清洗。拆除电池时，应先断开接地端（所有现代的汽车中均为负的一边），这样可以阻止电流，避免断开正极引线时潜在的火花。

系统注释　备用电池

许多系统中使用电池提供冗余，如在关键时刻报警系统的主电源可能断了，或备用市电失效的情况下。太阳能系统中，在没有太阳时由电池供电。深循环电池用比普通电池更重的极板构造，放电时间设计得比普通汽车电池更长。然而，深循环电池往往比较昂贵和低效，而且需要定期维护。

电池通常由内部电气连接在一起的多个电池芯组成，电池芯的种类与连接方式决定了电池的电压和电流容量。如果一个电池的正极连接下一个电池的负极，依次类推，如图 2-11a 所

示，则电池电压是各个电池芯电压的总和，这种连接方式称为串联连接。为了增加电池的电流容量，多个电池芯的正极连接在一起，而所有负极也被连接在一起，如图2-11b所示，这就是所谓的并联连接。



a）串联连接电池芯增加电压　　b）并联连接电池芯增加电流容量

图2-11　电池芯连接构成电池

小贴士　若长时间存放铅酸电池，应充分充电并将其放置在阴凉干燥的地方，防止冻结或温度过高。随着时间的推移电池会自行放电，因此需要定期检查，电量小于完全充电量的70%时需重新充电。电池制造商会将电池存放的具体建议放在其网站上。

电池可以有多种尺寸，大电池拥有更多的材料，可以提供更大的电流。除了根据尺寸和形状分类，电池还可以根据其化学构成进行分类，也可以按照是否可再充电来分类。一次性电池是不可充电的，由于其化学反应是不可逆的，因此用完以后将被丢弃；二次性电池是可重复使用的，其化学反应是可逆的。下面列举一些重要类型的电池。

- 碱性电池 MnO_2：这是掌上电脑、摄影器材、玩具、收音机和录音机中最常用的一次性电池，具有较长的保质期和比碳-锌电池更高的功率密度。
- 碳-锌电池：这类电池主要使用在手电筒、小家电中。根据其尺寸分为AAA、AA、C、D几个种类。
- 铅酸电池：这是一种二次性（可充电）电池，通常用于汽车、船舶和其他类似的应用中。深循环铅酸电池通常被用做系统的备用电池。
- 锂电池：这也是一种二次性电池，常用在各种类型的便携式电子设备中。这种类型的电池越来越多地被用在国防、航空航天和汽车应用中。
- 锂-二氧化锰电池：这是一次性电池，常用于照相和电子设备、烟雾报警器、人体组织、存储备份和通信设备中。
- 镍-金属氢化物电池：这是一种二次性（可充电）电池，常用于手提电脑、手机、摄像机和其他便携式消费电子产品中。
- 氧化银电池：这是一种一次性电池，常用于钟表、照相器材、助听器以及需要高容量电池的电子产品中。
- 锌-空气电池：这是一种一次性电池，常用于助听器、医疗监测仪器、传呼机以及类似的应用中。

燃料电池　燃料电池是一种直接将电化学能量转换为直流电压的装置。燃料电池将燃料（通常为氢）与氧化剂（通常是氧气）结合起来。在氢燃料电池中，氢气和氧气反应生成水，这是唯一的副产品，因此这个过程清洁、安静，且效率比燃烧高。燃料电池和电池同样都使用氧化还原化学反应，从而迫使其中的电子在外部电路中移动。然而，电池是一个封闭系统，所有的化学物质都存储在其内部；而在燃料电池中，氢气和氧气不断流入电池，它们在电池中结合并产生电力。

氢燃料电池通常按工作温度和所使用的电解质类型进行分类。有些类型适合在固定式发电厂工作，有些类型适合于小型便携式应用或驱动汽车。例如，最希望用于汽车的类型是聚合物质子交换膜燃料电池（PEMFC），这是一种氢燃料电池类型。图2-12所示的简单框图说明了

这种燃料电池的基本工作原理。

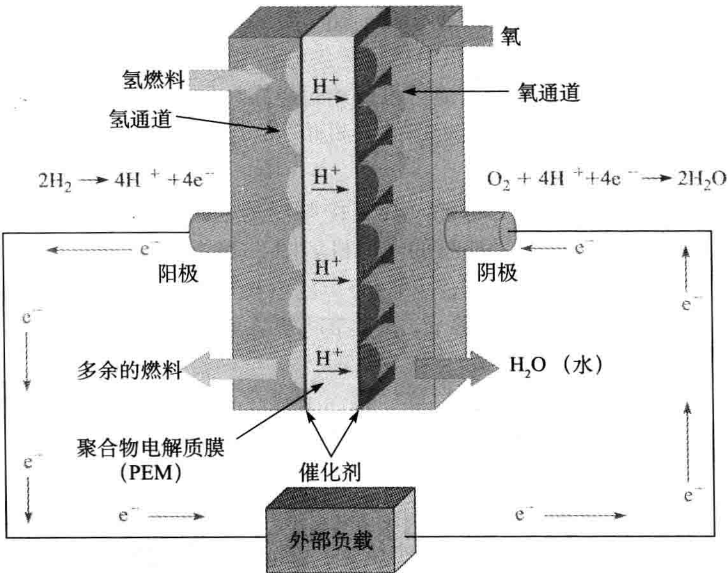


图 2-12　燃料电池的简单框图

通道将加压的氢气和氧气均匀地分散到催化剂表面，有利于氢气和氧气的化学反应。当一个氢分子（H_2）与燃料电池阳极上的铂催化剂接触时，分裂成两个氢离子（H^+）和两个电子（e^-），氢离子通过高分子电解质膜（PEM）被传递到阴极，电子通过阳极进入外部电路产生电流。

氧分子在阴极侧与催化剂接触时，被分裂形成两个氧离子，氧离子的负电荷吸引通过电解质膜到达的两个 H^+离子，并和从外部电路运动到达的电子相结合形成一个水分子（H_2O），这是通过电池产生的一种副产品。单个燃料电池反应产生的电压只有约 0.7V，为了得到更高的电压，需将多个燃料电池单元串联起来。

目前正在进行燃料电池的研究，并重点开发用于汽车和其他应用的更可靠、更小、成本效益更高的成分。转向燃料电池还要研究如何最有效地获取和提供氢燃料。氢的潜在来源包括利用太阳能、地热能、风能来分解水，也可以分解富含氢的煤或天然气分子获得氢。使用氢燃料电池的各种示范项目已经完成，例如，在美国阿拉斯加州安克拉治的邮件处理中心就是使用五个 200 千瓦燃料电池给大厦供电。

太阳电池　太阳电池的工作原理基于光伏效应，这是一个光能直接转换成电能的过程。一个基本太阳电池由两层不同类型的半导体材料结合在一起，从而形成一个结，当其中一层暴露在光线下时，这一层半导体材料中多个电子获得足够的能量摆脱原子束缚，越过结进入另一层半导体材料，这一过程在结的一侧形成负离子层，而在结的另一侧形成正离子层，从而在结两侧产生电位差（电压）。图 2-13 显示了一个基本的太阳电池结构。

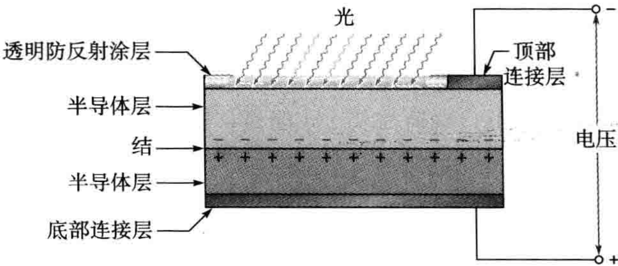


图 2-13　基本的太阳电池结构

尽管在室内光线下可以用太阳电池给计算器供电，但是研究的重点主要还是在如何将太阳

能转换为电能。当前，很多研究致力于提高太阳电池和光伏（PV）模块的效率，因为这是利用太阳光非常清洁的能源。完整的连续供电系统一般都需要一个备用电池在没有太阳光时提供能量，太阳电池非常适用于那些没有能源供给的远程供电，太阳电池还用于给卫星供电。

科学家们正在努力开发柔性太阳电池，可以通过钞票印刷过程打印出来，该技术采用类似印钞那样打印生产的可以低成本大规模生产的有机单元。“印刷电子”是聚合物技术研发的最前沿课题。

发电机 *发电机*将机械能转化为电能，其工作原理是电磁感应（见第7章）。线圈在磁场中旋转时，在线圈两端将产生电压。典型的发电机如图2-14所示。

直流电源 *直流电源*将壁装电源插座获得的交流电压转换为恒定电压（dc），从两个终端输出。基本的商用直流电源如图2-15所示，3.7节将更详细地介绍直流电源。

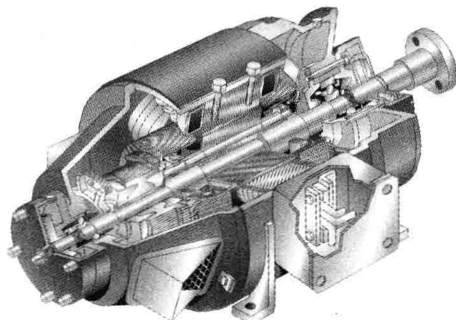


图2-14 直流电压发生器剖视图



图2-15 基本直流电源（由B+K Precision供图）

热电偶 *热电偶*是热电型电压源，通常用于感测温度。热电偶是两种不同金属接触而形成的结，其工作原理基于*塞贝克效应*，不同金属交界处所产生的电压是温度的函数。

热电偶的标准类型取决于所用的特定金属。在一定温度范围内，标准热电偶产生可预测的输出电压，输出电压代表一定范围的温度。最常见的热电偶是K型，由铬合金和铝镍合金制成。其他类型用字母E、J、N、B、R和S表示，大多数热电偶的形式是线形或探针形。

压电式传感器 这些传感器用做低功率的电压源，其工作原理基于*压电效应*，压电材料受机械外力作用变形时产生电压。石英和陶瓷是压电材料的两种类型。压电传感器用在各种系统中，如压力传感器、力传感器、加速度计、麦克风和超声波设备等。

本节测试题

1. 试给出电压的定义。
2. 电压的单位是什么？
3. 若移动10C电荷需要24J能量，则电压为多少？
4. 请列举七种电压源。
5. 在所有电池和燃料电池中会发生哪种化学反应？

2.4 电流

电压为电子提供能量，使电子能够在电路中运动，电子的这种运动就是电流。在电路中电子的运动导致做功。

学习完本节内容，应该能够

- 给出电流的定义并讨论电流的特性；
- 解释电子的运动；

- 写出电流的公式；
- 给出电流单位的定义和名称。

如前所述，在所有导体和半导体材料中存在自由电子，这些外层电子在材料结构内部沿任意方向从一个原子随机漂移到另一个原子，如图 2-16 所示。这些电子松散地与材料中的金属正离子结合，但由于热能，它们可以自由地在金属晶体结构周围移动。

如果给导电或半导电材料施加一个电压，一端为正另一端为负，如图 2-17 所示，则左端负电压产生的排斥力导致自由电子（负电荷）向右侧移动，而右端正电压产生的吸引力则将自由电子拉到右侧，其结果导致了自由电子从材料负端到正端的净运动，如图 2-17 所示。

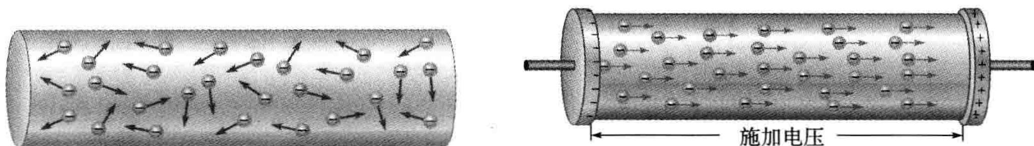


图 2-16 材料内自由电子的随机运动　　图2-17 给导电或半导电材料施加电压时从负到正的电子流

从材料的负端到正端的自由电子运动形成电流，用符号 I 表示。电流**就是电荷流动的速率。**导电材料中，电流由单位时间内通过某点的电子量（电荷量）测量得到。

$$I=\frac{Q}{t} \tag{2-3}$$

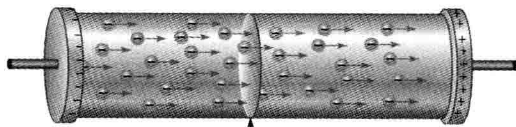
式中，I 是电流，单位为安培（A）；Q 是电子的电荷，单位为库仑（C）；t 是时间，单位为秒（s）。打个简单的比喻，把电流设想为对应于水系统管道中的水流，当泵（对应于电压源）施加压力（对应于电压）时产生水流。电压产生电流。

2.4.1 电流的单位

电流的度量单位称为安培（Ampere），简称安（amp），用符号 A 表示。

1A 电流表示在 1s 内通过给定截面 1C 电荷的电子。

如图 2-18 所示。记住，1C 电荷的电子数是 6.25×10^{18}。



当1s内载有1C电荷的电子通过截面时，电流是1A。

图 2-18 材料中 1A 电流（1C/s）图示

【例 2-3】 若 2s 内 10C 电荷流过导线的某一给定点，则电流为多少安培？

解： $I=\frac{Q}{t}=\frac{10\text{C}}{2\text{s}}=5\text{A}$

相关问题：如果有 8A 直流电流流过灯泡的灯丝，那么在 1.5s 时间里有多少库仑电荷通过灯丝？

2.4.2 电流源

理想电流源 我们已经知道，一个理想电压源能对任意负载提供恒定的电压。一个理想的电流源则可以给任意负载提供恒定的电流。正如电压源一样，理想的电流源也是不存在的，但在实际中可以近似于理想的电流源。本书除非另有说明，我们均假设电流源是理想的。

电流源的符号如图 2-19a 所示，理想电流源的特性如图 2-19b 中横线所示，该图称为 V-I 特性曲线。注意，对于任意电压，流过电流源的电流都是恒定的。非理想电流源的电流下降如

图 2-19b 中虚线所示。

实际电流源　电源通常被认为是电压源，因为它们是实验室最常见的电源，然而，电流源却是另一种类型的电源。电流源可以是“独立”的仪器，也可以和其他仪器组合在一起，如电压源、数字万用表或函数发生器。图 2-20 中所示的源测量单元是组合仪器的实例，这些单元可以被设置为电压源或电流源，包括一个内置的数字万用表以及其他仪器，它们主要用于检测晶体管和其他半导体器件。

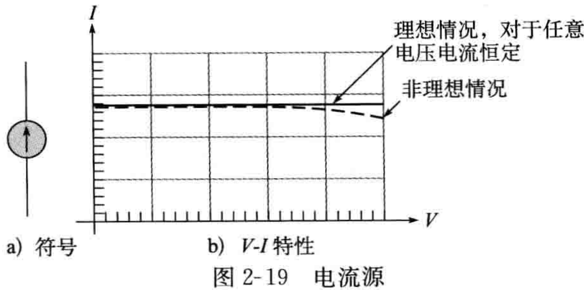
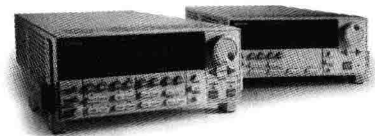


图 2-19　电流源


图 2-20　含有电压源和电流源的源测量单元（由吉时利仪器公司供图）

安全提示　为了给负载提供恒定的电流，电流源会改变其输出电压，例如，电表校准器根据被测表的不同可以输出不同的电压，因此，绝不能接触电流源的导线，其电压可能很高，会导致电击，尤其是当负载为高阻值或负载开路时合上电流源开关。

在大多数的晶体管电路中，晶体管充当一个电流源，因为晶体管 *V-I* 特性曲线的一部分是图 2-21 所示的晶体管特性的水平线，曲线图的平坦部分表示在一定电压范围内晶体管的电流是恒定的，恒定电流区域用做恒定电流源。

系统举例 2-1　电流源

电流源可用于各种汽车照明设备（尾灯、转向灯、刹车、日间行车灯、车内照明灯）和要求恒定照度的演播室灯光系统。由于高亮度发光二极管（LED）节能、高效、可靠、体积小，且能快速点亮，因此，在这些应用中很受欢迎。许多集成电路专门设计用来提供所需恒定照度的大电流，例如，照明 LED 的恒定电流驱动器 BP5843A，BP5843A 可接直流电源（113～170V）或交流电源（80～120V），并提供 250～350mA 的恒定电流，恒定值由用户设定。

一个基本的恒定电流照明系统如图 2-22 所示。输入的交流电流经过了滤波、变压和整流，转换为脉动直流。标记为 *C* 的元件为电容器，用于滤波、去除噪声（电容器将在第 9 章中讨论）；标记为 *R* 的元件为电阻器，用于设置通过高亮度发光二极管的电流量（电阻器在 2.5 节讨论）。

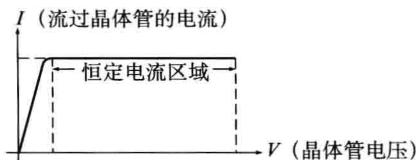


图 2-21　表示恒定电流区域的晶体管特性曲线

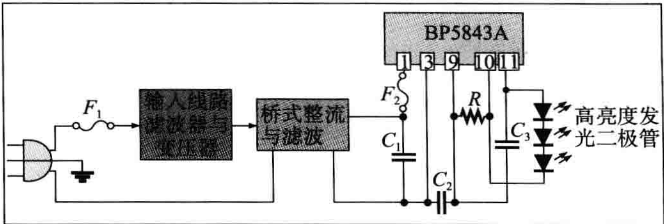


图 2-22　一个基本的恒定电流照明系统

本节测试题

1. 给出电流的定义，并说出其单位。
2. 多少个电子的电荷总量为一库仑？
3. 如果在 4s 内有 20C 电荷通过导线中一点，则电流为多少安培？

2.5　电阻

当有电流流过材料时，自由电子在该材料中移动，偶尔与原子发生碰撞，碰撞将导致电子损失一些能量，从而限制其运动。碰撞越多，运动受限的电子就越多。这种因碰撞引起的限制各不相同，随材料类型而改变。材料限制电子流动的属性称为电阻，用 R 表示。

学习完本节内容，应该能够

- 定义电阻并讨论其特性；
- 定义并命名电阻的单位；
- 描述电阻的基本类型；
- 由色码或标记确定电阻值。

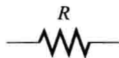


图 2-23　电阻的符号

电阻　与电流成反比。电阻的原理图符号如图 2-23 所示。

当电流通过任何具有电阻的材料时，自由电子和原子碰撞便产生热，因此，尽管典型的金属丝只有一个很小的电阻，但当有足够大的电流流过时，也会变暖甚至发热。

做个简单的比喻，将电阻设想成对应于封闭水系统中部分打开的阀门，用来限制管道中的水流量。如果阀门开得大（对应于较小的电阻），水的流量（对应于电流）增加；如果阀门关闭一些（对应于更大的电阻），水的流量（对应电流）减少。

2.5.1　电阻的单位

电阻 R 的单位是欧姆（ohm），用希腊字母 Ω 表示。1 欧姆（1Ω）电阻表示 1V 电压加在材料上时产生 1A 的电流。

电导　电阻的倒数为电导，用符号 G 表示。它用来表征电流建立的难易程度。其计算公式为

$$G=\frac{1}{R} \tag{2-4}$$

电导的单位是西门子，用符号 S 表示。例如，22kΩ 电阻的电导是

$$G=\frac{1}{22\text{k}\Omega}=45.5\mu\text{S}$$

2.5.2　电阻器

具有一定阻值的电阻元件被称为电阻器。电阻器的主要用途是限流、分压及在某些情况下产生热量。虽然不同类型的电阻器形状和尺寸各异，但都可以被分成两大类：固定电阻器或可调电阻器。

固定电阻器　固定电阻器的电阻值可选择范围很大，其电阻值在制造过程中设定，不易改变。固定电阻器可以使用不同的方法和材料构建，图 2-24 显示了几种常见的类型。

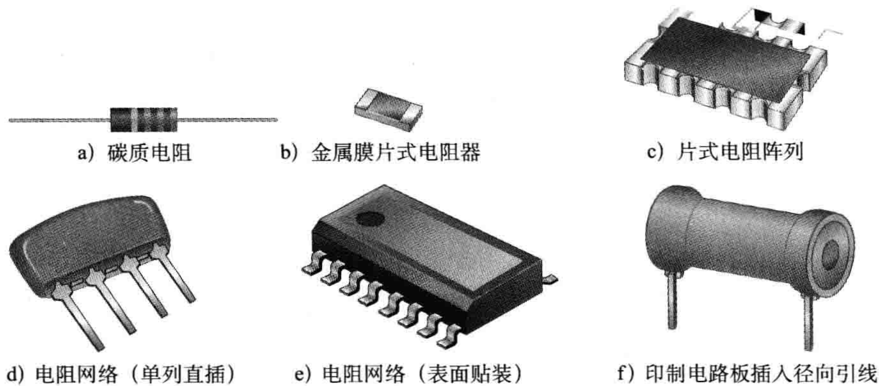


图 2-24　典型的规定电阻器

碳质电阻是最常见的固定电阻器，由碳粉、绝缘填料和树脂黏合剂混合组成（碳与绝缘填料的比例决定了电阻值的大小），混合物做成棒状并切成小段，加上引线连接即制成电阻器，整个电阻器封装在绝缘保护涂层里。图 2-25a 显示了典型碳质电阻器的结构。

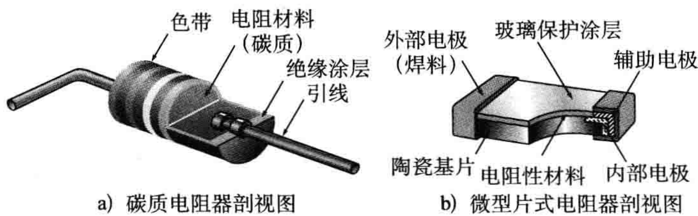


图 2-25　两种类型的固定电阻器（不按比例）

片式电阻器是另一种类型的固定电阻器，属表面贴装技术（SMT）元件。它的尺寸非常小，便于安装。小阻值片式电阻器（<1Ω）能以非常精确的公差（±0.5%）制成，常用做电流感应电阻器。图 2-25b 给出了片式电阻器的结构。

其他类型的固定电阻器包括碳膜、金属膜、金属氧化膜和线绕电阻器。膜式电阻器中，电阻性材料均匀地沉积到一个高品质陶瓷棒上形成电阻膜，电阻膜可能是碳（碳薄膜）或镍铬（金属膜）。在这些类型的电阻器中，使用螺旋技术沿着杆的螺旋图案除去部分电阻材料来获得所需的电阻值，如图 2-26a 所示。用这种方法可以实现精确的公差。薄膜电阻器还可以制作成电阻网络的形式，如图 2-26b 所示。

将电阻性导线绕在绝缘杆上，然后密封起来就构成了线绕电阻。通常情况下，线绕电阻器的额定功率相对较高。由于线绕电阻器是由一个线圈构成的，因此线绕电阻器的电感效应大，不能使用在高频情况。典型的线绕电阻器如图 2-27 所示。

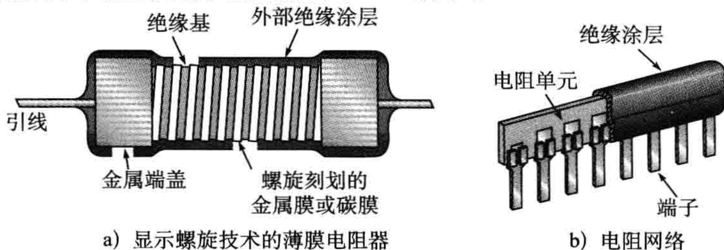


图 2-26　典型薄膜电阻器结构



图 2-27　典型的线绕功率电阻器

电阻器色码　某些类型电阻值公差为 5%或 10%的固定电阻器用四个条色环来表示其电阻值和公差。色码环系统如图 2-28 所示，色码列于表 2-1，色码环总是位于电阻器的一端。

四环色码按下面方法读出。

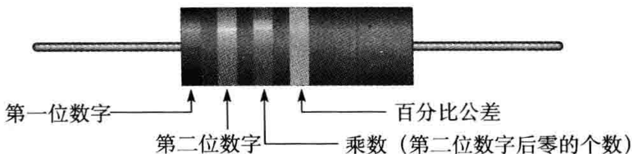


图 2-28　四环电阻器的色码环

1. 从最靠近电阻器一端色环开始，第一环是电阻值的第一个数字，如果不能判断哪一环最靠近电阻器端，可从没有金色或银色的环开始。

2. 第二环表示电阻值的第二个数字。

3. 第三环表示跟在第二个数字后零的个数，或称乘数。

4. 第四环表示百分比公差，通常为金色或银色。如果没有第四条色环，则公差为 ± 20%。

例如，5%公差是指实际电阻值在色码值的±5%之内，因此，公差为±5%的 100Ω 电阻器可接受的电阻值范围为从最小的 95Ω 到最大的 105Ω。

如表 2-1 所示，对于小于 10Ω 的电阻值，第三环是金色或银色，第三环为金色表示乘数为 0.1，银色表示乘数为 0.01。例如，四环分别为红、紫、金、银的颜色代码表示公差±10%，阻值为 2.7Ω。附录 A 列出了标准电阻值表。

【例 2-4】　找出图 2-29 所示色码电阻器的欧姆电阻值和百分数公差。

解：(a) 第一环为红色=2，第二环为紫色=7，第三环为橙色=3 个零，第四环为银色=±10%公差。

$$R = 27\,000\Omega \pm 10\%$$

(b) 第一环为棕色=1，第二环为黑色=0，第三环为棕色=1 个零，第四环为银色=±10%公差。

$$R = 100\Omega \pm 10\%$$

(c) 第一环为绿色=5，第二环为蓝色=6，第三环为绿色=5 个零，第四环为金色=±5%公差。

$$R = 5\,600\,000\Omega \pm 5\%$$

表 2-1　四环电阻色码

	数字	颜色
前三环表示电阻值： 第一环——第一个数字 第二环——第二个数字 第三环[①]——乘数（接在第二个数字后面的零的个数）	0	黑色
	1	棕色
	2	红色
	3	橙色
	4	黄色
	5	绿色
	6	蓝色
	7	紫色
	8	灰色
	9	白色
第四环——公差	±5%	金色
	±10%	银色

①对于小于 10Ω 的电阻值，第三环是金色或银色，金色表示乘数为 0.1，银色表示乘数为 0.01。

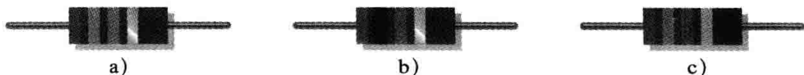


图 2-29　例 2-4 图

相关问题：某电阻器的第一环为黄色，第二环为紫色，第三环为红色，第四环为金色，试

确定该电阻器的电阻值和百分数公差。

五环色码　某些公差为2%、1%或更小的精密电阻器，一般采用五环色码，如图2-30所示。从最靠近电阻器端的色环开始，第一环表示电阻值的第一位数字，第二环表示电阻值的第二位数字，第三环表示电阻值的第三位数字，第四环为乘数（跟在第三位数字后零的个数），第五环表示公差。表2-2列出了五环色码的含义。

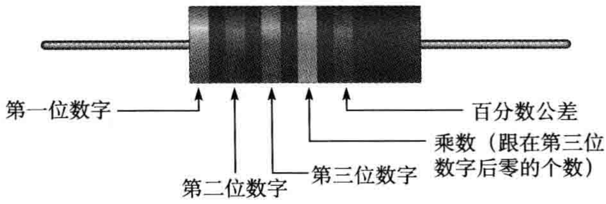


图2-30　五环电阻器上的色码环

表2-2　五环电阻器的色码

	数字	颜色
前四环表示电阻值： 第一环——第一位数字 第二环——第二位数字 第三环——第三位数字 第四环——乘数（跟在第三位数字后零的个数）	0	黑色
	1	棕色
	2	红色
	3	橙色
	4	黄色
	5	绿色
	6	蓝色
	7	紫色
	8	灰色
	9	白色
第四环——乘数	0.1	金色
	0.01	银色
第五环——公差	±2%	红色
	±1%	棕色
	±0.5%	绿色
	±0.25%	蓝色
	±0.1%	紫色

【例2-5】　找出图2-31所示各色码电阻器的电阻值和百分数公差。

解：(a) 第一环为红色＝2，第二环为紫色＝7，第三环为黑色＝0，第四环为金色＝×0.1，第五环为红色＝±2%公差。

$$R = 270 \times 0.1 = 27\Omega \pm 2\%$$

(b) 第一环为黄色＝4，第二环为黑色＝0，第三环为红色＝2，第四环为黑色＝0，第五环为棕色＝±1%公差。

$$R = 402\Omega \pm 1\%$$

(c) 第一环为橙色＝3，第二环为橙色＝3，第三环为红色＝2个零，第四环为橙色＝3，第五环为绿色＝±0.5%公差。

$$R = 332\ 000\Omega \pm 5\%$$

相关问题：某电阻器的第一环为黄色，第二环为紫色，第三环为绿色，第四环为金色，第五环为红色，试确定该电阻器的欧姆电阻值和百分数公差。

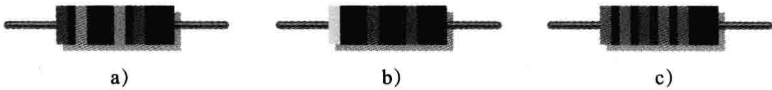


图2-31　例2-5图

电阻标签码　并非所有类型的电阻器都采用色码。许多电阻器采用印刷标记来指示电阻值和公差，包括表面贴装电阻。这些标签代码由数字（数值）或数字与字母的组合组成。在某些电阻数值很大的情况下，电阻值和公差以标准形式打印，例如，33 000Ω电阻器可标记为33kΩ。

数字标签使用三位数字标记电阻值。图2-32给出了一个具体的例子，前两位数字给出了电阻值的前两位数字，第三位数字给出乘数或前两位数字后零的个数，这种代码只能表示10Ω以上的电阻。

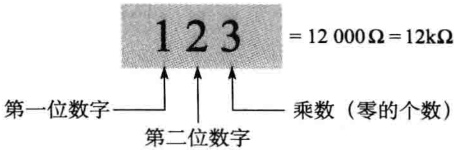


图2-32　电阻器的三位数字标签举例

另一种常见的标记方法是同时使用数字和字母的三个或四个字符的标签。典型的字母数字标签可以是只有三位数字，两个数字加一个字母或三个数字加一

个字母，字母可以是 R、K 或 M 其中之一，用来指定乘数，字母的位置用来表示小数点位置。字母 R 代表乘数为 1（数字后没有零），字母 K 表示乘数为 1000（数字后有三个零），字母 M 指定乘数为 1 000 000（数字后有六个零）。在这种格式中，100～999 的值由三个数字表示电阻值的三位数字，没有字母。图 2-33 给出了三个电阻器标签的例子。



图 2-33　字母数字电阻器标签举例

【例 2-6】　解释下列字母数字电阻器标签的含义。

(a) 470　(b) 5R6　(c) 68K　(d) 10M　(e) 3M3

解：(a) 470＝470Ω　(b) 5R6＝5.6Ω　(c) 68K＝68kΩ

(d) 10M＝10MΩ　(e) 3M3＝3.3MΩ

相关问题：试问 1K2 表示的电阻值是多少？

电阻公差标签系统采用字母 F、G 和 J：

F＝±1%　G＝±2%　J＝±5%

例如，620F 表示公差为±1%的 620Ω 电阻器，4R6G 表示 4.6Ω±2%电阻器，而 56KJ 表示 56kΩ±5%电阻器。

可调电阻器　可调电阻器的电阻值可以方便地调节。可调电阻器的两个基本用途是分压和控制电流。用于分压的可调电阻器称为*电位器*，而用于控制电流的可调电阻器称为*变阻器*，它们的原理图符号如图 2-34 所示。电位器是一个三端元件，如图 2-34 所示。端子 1 和 2 之间总电阻是固定的，端子 3 是可移动触点（抽头），可以通过改变移动接触位置来调节端子 1 和 3 之间的电阻或端子 3 和 2 之间的电阻。



图 2-34　电位器和变阻器的符号

图 2-34b 显示了作为两端可调电阻器的变阻器，而图 2-34c 则显示了如何通过将电位器的端子 3 与端子 1 或端子 2 连接构成变阻器，图 b 和图 c 符号是等效的。图 2-35 画出了一些典型的电位器，图中每个普通视图下面给出了其内部结构视图。

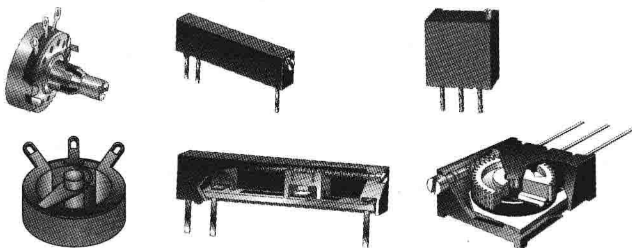


图 2-35　典型电位器及其结构视图

电位器和变阻器分为线性或锥形两种，以图 2-36 中总电阻为 100Ω 的电位器为例。图 2-36a的线性电位器中，移动端子与任一端之间的电阻随触点位置线性变化，例如，触点调到 1/2 圈时触点与端点之间电阻是总电阻的 1/2，触点调到 3/4 圈时触点与较远端点之间电阻是总电阻的 3/4，而触点与另一端点之间电阻则是总电阻的 1/4。

在锥形电位器中，电阻随触点位置呈非线性变化，因此触点跳到 1/2 圈时并不产生电阻。这一概念如图 2-36b 所示，这里非线性值是任意的。

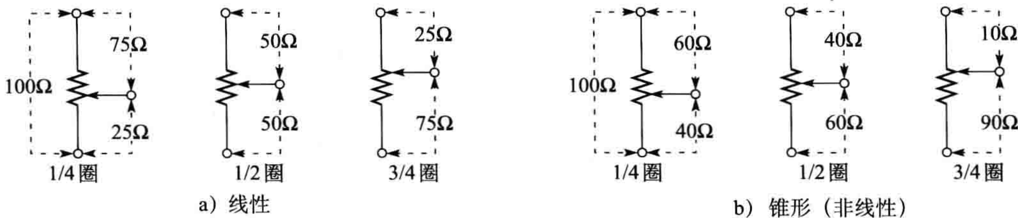


图 2-36 线性和锥形电位器举例

电位器可用做电压控制装置。当两个终端之间加固定电压时，可在滑动触头与任一终端之间得到一个可变的电压。变阻器可用做电流控制装置，它通过改变触点位置来调节电流。

可调电阻传感器 许多传感器依据可调电阻原理工作，由某个物理量来改变电阻值。根据传感器和测量要求，可以通过电阻变化改变电压或电流来直接或间接确定电阻变化。

电阻传感器的例子有*热敏电阻*、*光电导*、*应变计*。热敏电阻的电阻值是温度的函数，光电导的电阻为光的函数，而应变计的电阻则随其所受的力而改变。热敏电阻常用于自动调温器；光电导具有很多的应用，例如，用来控制路灯，黄昏时打开黎明时关闭；应变计则广泛用于秤和机械运动检测应用中，应变计的电阻变化非常小，所以要求测量仪器非常敏感。图 2-37 显示了各类电阻传感器的符号。

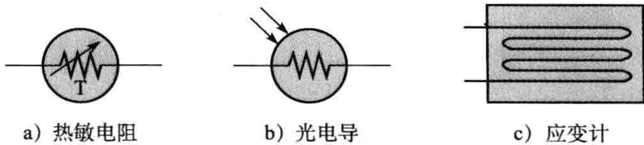


图 2-37 对温度、光和力感测的电阻器件符号

系统注释 卡车秤

许多大型称重使用应变计作为基本传感器来检测压力，例如卡车称重。应变计是完整机电组件的一部分，共包含四片。通常情况下，应变计用细线做成回形模式，贴到钢梁或板上。当钢梁受重弯曲时，就会拉伸或压缩应变计的金属丝，从而改变其电阻。应变计检测出电阻的变化，并转换为表示相应重量的数字。

本节测试题

1. 给出电阻的定义及其单位名称。
2. 电阻器的两个主要类别是什么？简述它们的区别。
3. 在四环电阻器色码中，每一个色环分别表示什么含义？
4. 试确定下列色码所表示的电阻值和百分比公差。
   (a) 黄、紫、红、金
   (b) 蓝、红、橙、银
   (c) 棕、灰、黑、金
   (d) 红、红、蓝、红、绿
5. 下列字母数字标签所指示的电阻值是什么？
   (e) 33R
   (f) 5K6
   (g) 900
   (h) 6M8
6. 电位器和变阻器的基本区别是什么？

7. 说出三种电阻传感器名称及影响其电阻值的物理量。

2.6 电路

基本电路由一些物理元器件组成，利用电压、电流和电阻实现特定的功能。

学习完本节内容，应该能够

- 描述一个基本的电路；
- 将原理图与对应的物理电路联系起来；
- 给出开路和闭路的定义；
- 描述各种类型的保护装置；
- 描述各类开关；
- 解释导线尺寸与规格型号的关系；
- 定义接地和公共端。

电路基本上由电压源、负载和电源与负载之间的电流路径构成。负载是一种由通过它的电流做功的装置。图 2-38 给出了一个简单的电路例子：两个导体（导线）将灯泡和电池连接起来，电池是电压源，灯泡是电池的负载，它从电池吸取电流，两条导线提供了从电池负极端经灯泡再返回电池正极端的电流路径，如图中箭头所示。当电流流过灯泡的灯丝（具有一定电阻）时，灯丝发热并发出可见光，流过电池的电流则由其内部的化学反应产生。

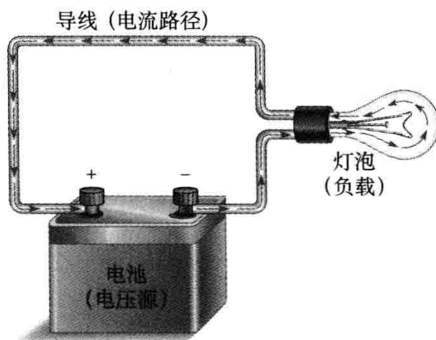


图 2-38 简单电路

在许多实际情况下，电池的一端被连接到一个接地（公共）点。例如，在汽车中，电池的负极端通常连接到汽车的金属底盘，底盘是汽车电气系统的地，同时提供电路的电流通路（接地的概念在本章的后面部分介绍）。

我们知道，方框图是表示系统信号路径和功能模块的基本方法，然而，对大型系统进行故障排除或分析却需要电路的细节，这时电路原理图很有用。电路原理图是一种电路结构图，用标准符号和标识符来表示元器件，用线条来表示导体。电路原理图显示电路的逻辑组织方式，通过它可以确定电路的工作情况。电路原理图可能与电路的物理布局差别很大，电路原理图的画法通常是让信号的流向按由左到右布局。一般原理图使用的符号均已被各种标准组织标准化，美国使用的标准是 IEEE STD315—1975，可从美国国家标准学会（ANSI）获得，本书将在需要时介绍这些符号。图 2-39是对应于图 2-38 中电路的原理图。

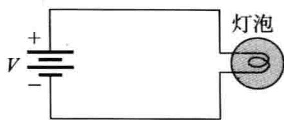


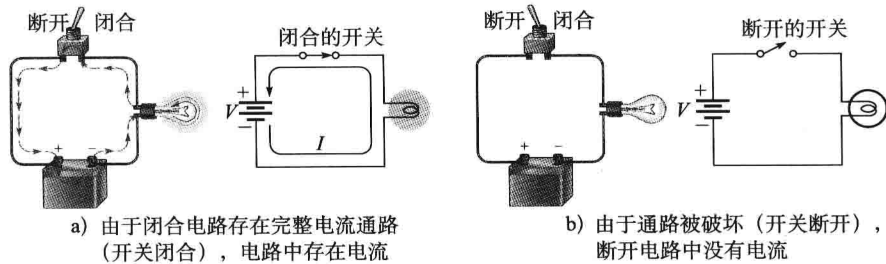
图 2-39 对应图 2-38 中电路的原理图

2.6.1 电路的电流控制与保护

图 2-40a 给出的电路表示一个闭合电路。存在完整电流通路的电路称为闭合电路，简称闭路。断开电路（简称开路）是指电路中的电流路径被破坏，没有任何电流存在，如图 2-40b 所示。开路可视为具有无穷大的电阻（无穷大意为非常非常大）。

安全提示 为防止触电，禁止在电路接在电压源时触碰电路，如果需要处理电路或拆除元器件或更换元器件，首先应确保断开电压源。

机械式开关　开关通常用于控制电路的断开或闭合。例如，在图2-40中用一个开关开启或关闭一盏灯，图中每个电路实物图都有一个对应的原理图，这类开关为单刀单掷（SPST）拨动开关。术语“刀”指开关的动臂，而术语“掷”表示由单一开关动作（刀的单一运动）可能引起的（打开或关闭）接触数目。

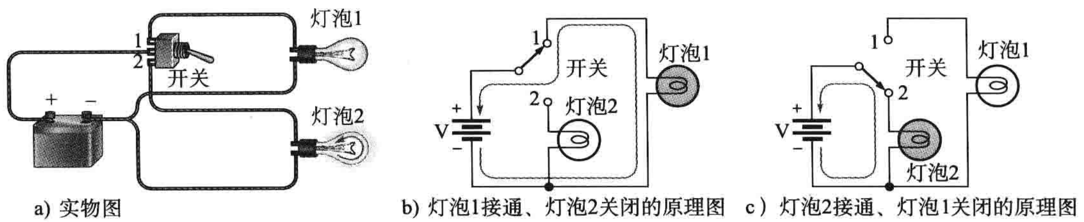


a）由于闭合电路存在完整电流通路（开关闭合），电路中存在电流

b）由于通路被破坏（开关断开），断开电路中没有电流

图2-40　用SPST开关作控制的闭合和断开电路示例

图2-41给出了一个稍复杂的电路，使用单刀双掷（SPDT）开关控制电流流向两个不同的灯泡。当一盏灯接通时，另一盏灯关闭，反之亦然。两个原理图分别表示了开关的不同位置。

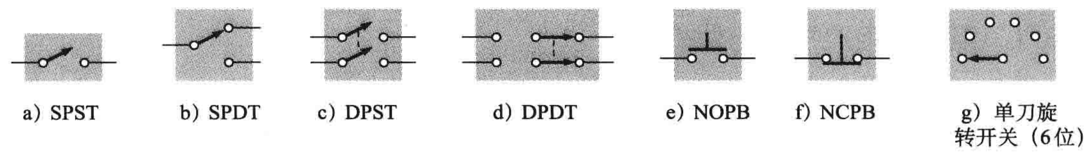


a）实物图　b）灯泡1接通、灯泡2关闭的原理图　c）灯泡2接通、灯泡1关闭的原理图

图2-41　用SPDT开关控制两个灯泡举例

除了SPST和SPDT开关（符号如图2-42a和b所示），下面这些类型的开关也是很重要的。

- 双刀单掷（DPST）：DPST开关允许同时断开或闭合两套触点，其符号如图2-42c所示。虚线表示接触臂的机械连接，以使两者的开关动作一致。
- 双刀双掷（DPDT）：DPDT开关控制一组两个触点分别与另一组两个触点的连接，其原理图符号如图2-42d所示。
- 按钮（PB）：常开按钮开关（NOPB）如图2-42e所示，按钮被按下时两个触点连接，而释放按钮时两个触点断开；常闭按钮开关（NCPB）如图2-42f所示，按钮被按下时两个触点断开，而释放按钮时两个触点连接。
- 旋转式：旋转开关通过旋钮转动使一个触点与其他若干个触点之一连接。图2-42g为一个简单六位旋转开关的符号。



a）SPST　b）SPDT　c）DPST　d）DPDT　e）NOPB　f）NCPB　g）单刀旋转开关（6位）

图2-42　开关符号

图2-43给出了几类开关，图2-44给出一个典型切换开关的结构图。除了机械开关，在一些应用中晶体管可以等效于单刀单掷开关。



图 2-43　典型的机械式开关

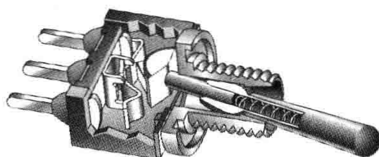


图 2-44　典型拨动开关结构图

小贴士　如果焊接时过热，小型电子部件容易损坏。图 2-43 所示的小型开关常用塑料制作，过热就会融化使开关失效，因此，制造商通常会提供一个无危险使用的最长时间和温度。为了防止焊接时过热，可以在焊点与元件敏感区域之间临时连接一个小散热片。

保护装置　在电流通路中设置有熔断器[⊖]和断路器，当电路出现故障或其他异常状况使得电流超过指定安培数时，可人为造成一个断路。例如，当电流超过 20A 时，额定电流 20A 的熔断器或断路器将断开电路。

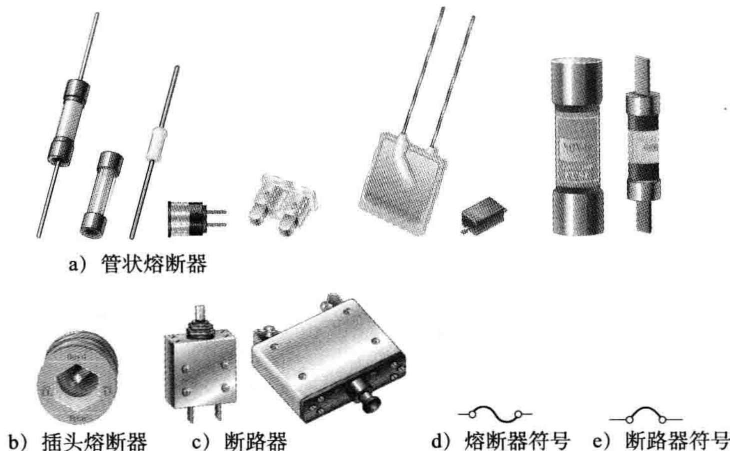
熔断器和断路器之间的基本区别是，熔断器"烧断"了必须更换，而断路器断开电路时可以复位并重复使用。这两个装置都能防止由于过量电流损坏电路或防止电流过大电线和其他组件过热出现危险。由于熔断器切断过大电流比断路器迅速，因此，精密电子设备的过流保护多采用熔断器。几种典型熔断器和断路器及其原理图符号如图 2-45 所示。

根据其物理结构，熔断器分为管状和插头（旋入式）两个基本类别。管状熔断器有多种外形的引线或其他类型触头，如图 2-45a 所示；典型的插头熔断器如图 2-45b 所示。熔断器工作时基于电线或其他金属元素的熔融温度，随着电流的增大，熔丝加热，一旦超过额定电流，达到熔丝的熔点温度，电路断开切断电路的电源。

熔断器有快熔和延时（慢熔）两种。快熔熔断器为 F 类，延时熔断器为 T 类。正常工作中，熔断器常常承受超过额定电流的间歇性浪涌电流，例如电路接通电源瞬间，随着时间的推移，这将降低熔断器承受短时间浪涌或均匀额定电流的能力。慢熔熔断器能承受的浪涌电流比快熔熔断器更大，持续时间更长。熔断器的符号如图 2-45d 所示。

典型的断路器如图 2-45c 所示，其原理图符号如图 2-45e 所示。断路器一般通过电流的热效应或电流产生的磁场来检测是否过流。在基于电流热效应的断路器中，当电流超过额定值时，双金属弹簧断开触点，一旦开路，触点通过机械方式保持断开状态，直到手动复位。在基于磁场的断路器中，则由超过额定值的电流产生的足够磁力断开触点，同样必须手动复位。

⊖ 熔断器有时也称保险丝。——译者注



a) 管状熔断器

b) 插头熔断器　c) 断路器　d) 熔断器符号　e) 断路器符号

图 2-45 典型熔断器和断路器及其符号

安全提示 务必使用完全绝缘的熔断器拔钳拆卸和更换电箱的熔断器。即使开关处于断开位置，电箱中仍然有线电压存在，切勿使用金属工具拆卸和更换熔断器。

系统举例 2-2

图 2-46 显示了一个科学展览项目的测验板，这是一个使用本章介绍的元件的小系统例子。该电路的操作过程如下：用户旋转开关至四个位置中的一个以选择一个电池类型（用灯指示），选择电池类型后，按下对应于所选电池的正确电池电压的按钮，只有当所选按钮正确，"正确"的灯才会点亮。测验板上，对应电池 1、2、3 和 4，制作了正确答案 B、D、A、C，电路中增加了变阻器来控制所有灯的亮度，电路应加熔断器。

该电路的原理图如图 2-47 所示。注意，旋转开关的每个位置连接到一个指示灯，仅一个按钮开关对应于正确答案。

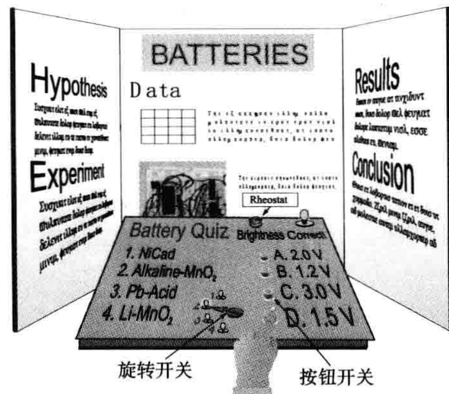


图 2-46 测验板

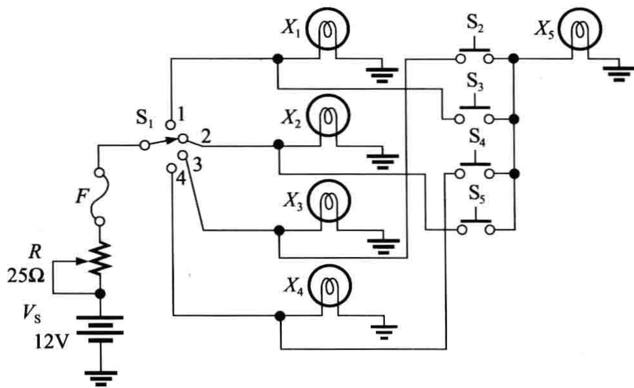


图 2-47 测验板电路原理图

2.6.2 导线

导线是电气应用中最常见的导电材料。按导线的直径大小定义标准规格型号，称为 AWG（美国线规）尺寸。规格号越大，导线直径越小。导线尺寸大小也可以用截面积来表示，如图 2-48所示。横截面积的单位是圆密耳，缩写为 CM。一圆密耳表示直径为 0.001 英寸（0.001in 或 1 密耳）导线的面积。横截面积的圆密耳值可以用千分之一英寸（密耳）的直径值

平方得到，如下式所示：

$$A = d^2 \tag{2-5}$$

式中，A 是截面积，单位是圆密耳；d 是直径，单位是密耳。表 2-3 列出了 AWG 尺寸对应的截面积以及 20℃时 1000 英尺长导线的欧姆电阻值。

图　2-48

表 2-3　AWG（美国线规）尺寸及实心圆铜线的电阻

AWG#	面积（CM）	电阻值（Ω/1000 英尺，20℃）	AWG#	面积（CM）	电阻值（Ω/1000 英尺，20℃）
0000	211 600	0.0490	19	1 288.1	8.051
000	167 810	0.0618	20	1 021.5	10.15
00	133 080	0.0780	21	810.10	12.80
0	105 530	0.0983	22	642.40	16.14
1	83 694	0.1240	23	509.45	20.36
2	66 373	0.1563	24	404.01	25.67
3	52 634	0.1970	25	320.40	32.37
4	41 742	0.2485	26	254.10	40.81
5	33 102	0.3133	27	201.50	51.47
6	26 250	0.3951	28	159.79	64.90
7	20 816	0.4982	29	126.72	81.83
8	16 509	0.6282	30	100.50	103.2
9	13 094	0.7921	31	79.70	130.1
10	10 381	0.9989	32	63.21	164.1
11	8 234.0	1.260	33	50.13	206.9
12	6 529.0	1.588	34	39.75	260.9
13	5 178.4	2.003	35	31.52	329.0
14	4 106.8	2.525	36	25.00	414.8
15	3 256.7	3.184	37	19.83	523.1
16	2 582.9	4.016	38	15.72	659.6
17	2 048.2	5.064	39	12.47	831.8
18	1 624.3	6.385	40	9.89	1 049.0

【例 2-7】试问直径为 0.005 英寸的导线截面积是多少？

解：

$$d = 0.005\text{ 英寸} = 5\text{ 密耳}$$

$$A = d^2 = (5\text{ 密耳})^2 = 25\text{CM}$$

相关问题：试问直径为 0.0201 英寸的导线截面积是多少？对照表 2-3，该导线的 AWG 规格号是什么？

导线的电阻　虽然铜导线传导电流非常好，但它仍然有一定的电阻，所有导线都是如此。导线的电阻取决于三个物理特性：材料种类、导线长度和横截面积。此外，温度也会影响导线电阻。

每种材料都有一个称为电阻率的特性参数，用希腊字母 ρ 表示，给定温度时每种材料的 ρ 是一个恒定的值。长度为 l 截面积为 A 的导线的电阻计算公式是

$$R = \frac{\rho l}{A} \tag{2-6}$$

这个公式表明，电阻值随电阻率和长度的增加而增大，随横截面面积的增加而减小。若导线长度的单位为英尺（ft）、横截面面积的单位为圆密耳（CM）、电阻率的单位为 CM-Ω/ft，则计算得到的电阻单位为欧姆。

系统注释 连接器

连接器接驳布线和系统组件，连接器的尺寸和类型取决于信号数量及类型、功率要求。环境和物理要求，连接器应是机械坚固、可靠，并提供低电阻接触。连接器松动或腐蚀将使电阻高于正常值，并可能导致内部电弧故障和击穿。

大多数系统中，连接器的可靠性是至关重要的。美国航空航天局曾经遭遇过由于连接问题而延误任务的情况，现已制定一些针对空间飞行任务的连接器可靠性测试。出于这个原因，生命支持系统、太空系统和军事系统对系统连接器都有独特的要求和规格。

【例 2-8】 请确定长为 100ft，截面积为 810.1CM 的铜质导线的电阻。20℃时铜的电阻率为 10.37CM-Ω/ft。

解：

$$R=\frac{\rho l}{A}=\frac{(10.37\text{CM-}\Omega/\text{ft})\times(100\text{ft})}{810.1\text{CM}}=1.280\Omega$$

相关问题：利用表 2-3 确定截面积为 810.1CM 的 100ft 长铜质导线的电阻，并与计算结果进行比较。

如前所述，表 2-3 列出了 20℃时每 1000 英尺各种标准尺寸导线的电阻，单位为 Ω。例如，1000 英尺长的 14 号铜线的电阻为 2.525Ω，1000 英尺长的 22 号线的电阻为 16.14Ω。给定导线长度，规格号小的导线具有更小的电阻，因此，给定电压，规格号小的导线比规格号大的导线能承载的电流大。

拼接导线 某些系统中需要拼接导线，尤其是路线较长时，电缆拼接的具体规则由国家电气规程（National Electric Code，NEC）给定。拼接一般要求导线干净，具有良好的电气和机械连接，大部分时间拼接置于电气箱内保护起来。对于小直径导线，压接型连接器很有用且速度快，可利用压接工具进行连接。

除了用于接地的导体，拼接中也允许将导线焊接在一起，前提是在焊接之前，已经做了良好的机械连接。导线拼接后，拼接点应进行绝缘包裹，使之与导线的绝缘层具有同样绝缘效果。

要避免使用不同材质的导线进行拼接，如铝线和铜线的拼接，这种情况下在交界处可能会发生名为电解的化学反应，导致高接触电阻使连接失败。不同导体拼接的另一个问题是，两种导体受热膨胀不同，会使接头松开使连接失败。

2.6.3 接地

接地是一个电路中的参考点，术语接地源于一个事实，即电路的某个导体通常与一个埋入地下的 8 英尺长的金属连杆连接。现在这种连接称做接大地。家庭布线中接地用绿色或裸铜线标记，为安全起见，金属机箱或金属电箱通常要接大地。遗憾的是，有些地方未按规则接地，如果金属机箱不接大地，可能存在安全隐患。在对仪器或设备做任何工作之前，应先确认金属机箱处于实际大地的电位。

另外一种接地称为参考接地。电路中某点电压总是相对于另一点而言的，如果这个对应点没有指明，则就是参考接地点。电路中参考接地点定义为 0V，参考接地与大地可以具有完全不同的电位，由于参考接地表示一个公共导体，也称为公共点，标记为 COM 或 COMM。实验室面包板布线时，通常会保留一条总线带（沿板长度方向的长线）作为公共端导体。

三种接地符号如图 2-49 所示。遗憾的是，没有一个单独的符号来区分接大地和参考接地。图 2-49a 中的符号既表示接大地又表示参考接地，图 2-49b 中的符号表示机箱接地，而图 2-49c 中的符号是一种替代参考符号，用于电路中有多个公共连接（common connection）时（如电路

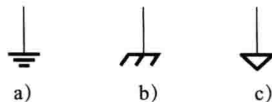


图 2-49 接地符号

中的模拟地和数字地)。本书中全部使用图2-49a中的符号。

图2-50给出了一个带有接地连接的简单电路。电流从12V电压源的负端流出，经过公共接地连接、灯泡，再由导线回到电源正极。接地提供了从电源出来的电流通路，由于所有接地点都是电气上的同一个点，提供了电阻为0（理想情况）的电流通路，电路顶部对地的电压为+12V，可以认为电路中的所有接地点用一个导体连接在一起。

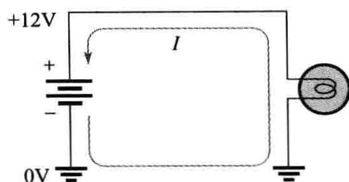


图2-50 带有接地连接的简单电路

本节测试题

1. 电路有哪些基本要素?
2. 给出断开电路的定义。
3. 给出闭合电路的定义。
4. 打开的开关电阻是多大? 理想情况下闭合开关的电阻是多大?
5. 熔断器的用途是什么?
6. 熔断器和断路器的区别是什么?
7. 试问AWG#3和AWG#22两种导线哪个直径更大?
8. 电路中接地是什么?

2.7 基本电路测量

处理电气、电子电路工作常常要测量电压、电流和电阻，并能安全、正确地使用电表。学习完本节内容，应该能够

- 进行基本的电路测量;
- 在电路中正确测量电压;
- 在电路中正确测量电流;
- 正确测量电阻;
- 设置和读取电表。

电气和电子工作中常需要对电压、电流和电阻进行测量，测量电压的仪表是*电压表*或*伏特表*，测量电流的仪器是*电流表*或*安培表*，测量电阻的仪器为*欧姆表*。一般情况下，这三个仪器组合成一台仪器，称为*万用表*，可以用开关选择相应功能对特定物理量进行测量。

典型的便携式万用表如图2-51所示，其中图2-51a为数字万用表（DMM），被测物理量的读数是数字；图2-51b为指针式模拟万用表。许多数字万用表还包括了条状图显示。



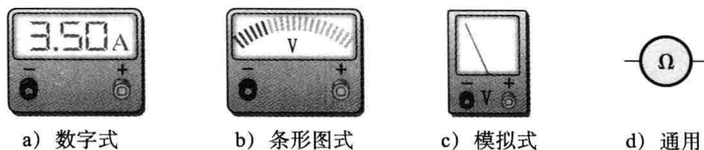
a) 数字万用表 b) 模拟万用表

图2-51 典型便携式万用表

a) 经福禄克公司授权转载;
b) 由B+K Precision供图

2.7.1 仪表符号

本书使用特定符号在电路中表示仪表，如图2-52所示。四种类型的符号都可能用来表示电



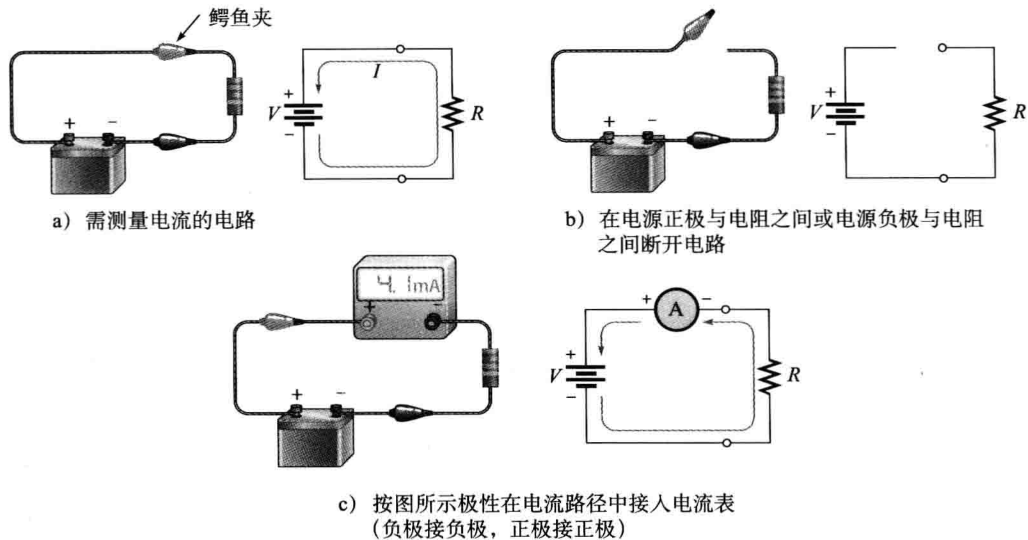
a) 数字式 b) 条形图式 c) 模拟式 d) 通用

图2-52 本书所用仪表符号举例，每个符号都能用来表示电流表（A)、电压表（V）或欧姆表（Ω)

压表、电流表或欧姆表，主要取决于哪个符号能最有效地表达所需的信息。数字仪表符号用在电路中需要指示特定数值的情况。条形图仪表符号用来说明电路的工作，有时也用模拟仪表符号，这种情况要描绘的是相对测量或物理量的变化而不是特定数值，变化量在显示中用箭头表示其增加或减少。当没有数值或数值的变化需要显示时，可用通用符号来表示仪表在电路中的位置。

2.7.2　测量电流

图2-53列出了如何使用电流表测量电流的方法。图2-53a是一个简单电路，其中流过电阻的电流需要测量；要在电流通路中连接电流表，首先断开电路，如图2-53b所示；然后插入仪表，如图2-53c所示，这种连接方式称为串联。仪表的极性必须正确连接，以使电流从负极流入从正极流出[⊖]。如果使用DMM测量电流，导线必须插入特定的电流插孔。



a）需测量电流的电路

b）在电源正极与电阻之间或电源负极与电阻之间断开电路

c）按图所示极性在电流路径中接入电流表（负极接负极，正极接正极）

图2-53　简单电路中测量电流的电流表连接举例

2.7.3　测量电压

为了测量电压，需要将电压表跨接在被测元件的两端，这种连接方式称为并联。电表的负极应接到电路的负极一侧，而电表的正极则应接到电路的正极一侧。图2-54显示了测量电阻两端电压时电压表的接法。

安全提示　接触电路工作时不得配戴戒指或其他任何金属饰品，这些饰品可能会意外地与电路接触，引起电击和/或损坏电路。对于像汽车电池这类高能量电源，饰品（手表或戒指）短路时会立即变得很热，极易烧伤佩戴者。

2.7.4　测量电阻

要测量电阻，应将欧姆表跨接在电阻两端，电阻首先应从电路中断开或拆下，这一过程如图2-55所示。

⊖　本书电流的方向用电子流向定义，不同于一般教科书以正电荷流向定义。——译者注

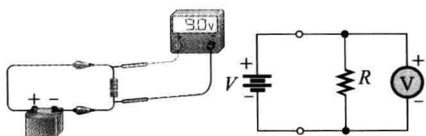
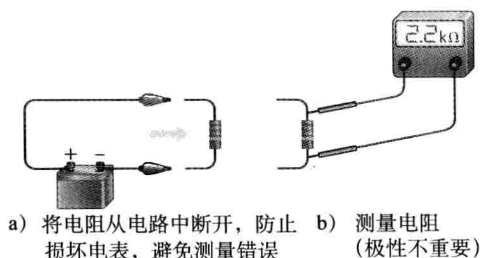


图 2-54 简单电路中测量电压的电压表连接举例



a) 将电阻从电路中断开，防止损坏电表，避免测量错误　b) 测量电阻（极性不重要）

图 2-55 用欧姆表测量电阻举例

2.7.5 数字万用表

数字万用表（DMM）是一种多功能电子仪器，可以测量电压、电流或电阻。数字万用表是使用最广泛的一类电子测量仪器。通常，数字万用表比模拟万用表功能更多、精度更高、读取更方便、可靠性更高，已经逐步取代了模拟万用表。但是，模拟万用表相比数字万用表能跟踪短时的变化和被测量的变化趋势，因为许多数字式万用表的测量响应速度太慢。典型数字万用表如图 2-56 所示。许多数字万用表为自动调节型，其合适的测量范围是由内部电路自动选择的。



图 2-56 典型数字万用表（由 B+K Precision 供图）

DMM 的功能 大多数 DMM 具有的基本功能是：测量电阻、直流电压和电流以及交流电压和电流。

有些 DMM 提供附加功能，如模拟条形图显示、晶体管或二极管测试、功率测量、音频放大器测试中的分贝测量等。

DMM 显示 DMM 有两种读数方式：液晶显示（LCD）和发光二极管（LED）。LCD 在电池供电的仪器中用得最广，因为 LCD 仅需要非常小的电流。一个典型 LCD 读数的 DMM，9V 电池供电能维持数百小时至 2000 小时，甚至更长。LCD 读数的缺点是：在低光照条件下很难或根本不可能看清楚，且测量响应速度慢。另一方面，LED 则在黑暗条件下也能看到，且能快速响应测量数值的变化，LED 显示需要比 LCD 大得多的电流，因此，在便携式设备中使用 LED 时电池的寿命很短。

安全提示

制造商使用 CE 标志表明产品全部符合欧盟指令的健康和安全基本要求，例如，满足 IEC 61010-1 指令的 DMM 是合规的，可以使用 CE 标志。在许多国家这个标志用于很多产品，很像起源于美国的 UL 标志，也表明符合安全标准。



DMM 的 LCD 和 LED 显示都采用七段格式，每个显示的数字由七个分离的段构成，如图 2-57a所示。每个十进制数字通过激活相应的段形成，如图 2-57b 所示。除了七个段，还有一个小数点。

分辨率 DMM 的分辨率是其可以测量的最小增量数值。增量越小，分辨率越高。确定仪表分辨率的一个因素是显示的数字位数。

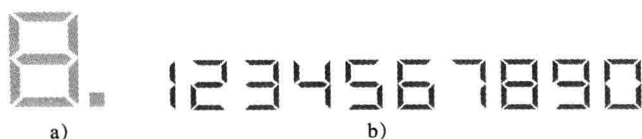
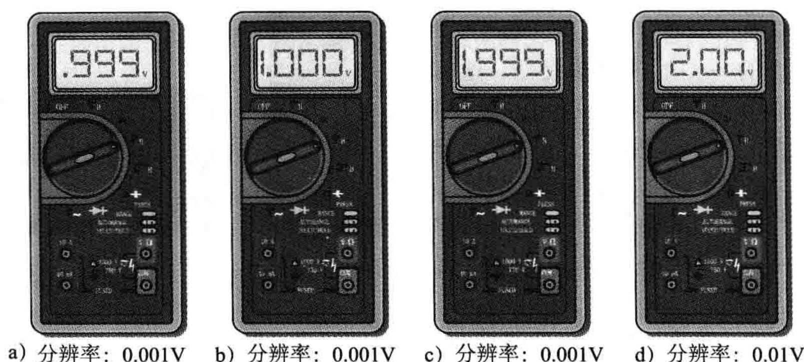


图 2-57 七段显示

许多数字万用表显示 $3\frac{1}{2}$ 位数字，下面就以这种情况来说明分辨率。$3\frac{1}{2}$ 位数字万用表有三个数字位用于显示从 0 到 9 的数字，另有一个数字位称为半位数，仅能显示数值 1，始终显示最高位有效数字。例如，假设 DMM 读 0.999 V，如图 2-58a 所示，如果电压增加 0.001V 达到 1V，正确显示为 1.000V，如图 2-58b 所示。“1”是半位数字，因此，$3\frac{1}{2}$ 位数字 DMM 可以观察到的变化为 0.001V，这就是分辨率。



a) 分辨率：0.001V　b) 分辨率：0.001V　c) 分辨率：0.001V　d) 分辨率：0.01V

图 2-58 $3\frac{1}{2}$ 位 DMM 演示分辨率如何随使用中数字变化而改变

现在假设电压增加到 1.999V，该值在电压表上显示如图 2-58c 所示，如果电压再增加 0.001～2V，而半位数字不能显示“2”，所以显示为 2.00，半位数字消隐只有三位数字有效，如图 2-58d 所示。由于仅有三位数字有效，分辨率为 0.01V 而不是 $3\frac{1}{2}$ 位有效数字时的 0.001V，直至电压到 19.99V，分辨率都是 0.01V。对于 20.0～199.9V 的读数，分辨率只有 0.1V；达到 200V 电压，分辨率变为 1V，依次类推。

DMM 的分辨能力还由内部电路及被测量的采样率决定，具有 $4\frac{1}{2}$ 位～$8\frac{1}{2}$ 位显示的 DMM 都有产品可用。

精度 根据第 1 章的定义，精度是误差范围的表示，通常表示成百分数，测量误差为物理量的测量值与真值或可接受值之间的差。DMM 的精度严格由其内部电路和校准确定，典型仪表的精度范围为 0.01%～0.5%，某些精密实验室级的仪表可达 0.002%。

2.7.6 读取模拟式万用表

虽然现在主要使用 DMM，但是，有时还可能需要使用模拟式仪表。

功能 典型的模拟式（指针式）万用表面板如图 2-59 所示。这种特殊的仪器可用于测量直流（dc）和交流（ac）及电阻值。它有四个可供选择的功能：DC VOLTS（直流电压）、DC mA（直流毫安电流）、AC VOLTS（交流电压）和 OHMS（电阻）。许多模拟万用表都与此类似，只是测量范围选择和刻度有所变化。

量程　每一功能都有几个量程（测量范围），在选择开关边上的括号里标记。例如，DC VOLTS 功能含有 0.3V、3V、12V、60V、300V 和 600V 六个量程，因此，从满刻度 0.3V 到满刻度 600V 的直流电压都能测量；在 DC mA 功能，从 0.06mA 满刻度到 120mA 满刻度的直流电流能被测量；而在欧姆刻度上，量程设定为×1、×10、×100、×1000 和×10 000。

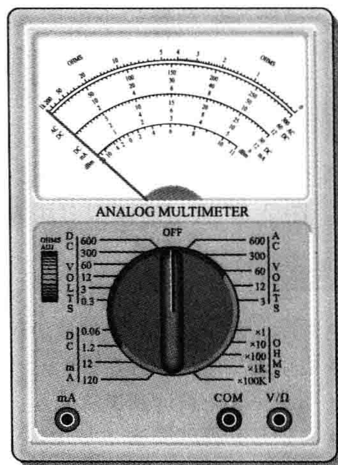


图 2-59　一款典型的模拟万用表

小贴士　读取模拟仪表的刻度时，直接在刻度和“指针”的前方看，不能有角度。这样做能避免视差，因为指针和仪表刻度之间有明显的相对位置变化，这样会导致不准确的读数结果。

欧姆刻度　欧姆读数在表的最上一条刻度，这个刻度是非线性的，即每格（大或小）所表示的数值随刻度位置变化。注意，在图 2-59 中从右往左刻度越来越压缩。

要读取实际欧姆值，需将指针指示的刻度数乘以开关选择的因子。例如，当开关设置在×100挡时，指针指在 20，则读数应为 20×100＝2000Ω。

另一个例子，假设开关设在×10 而指针在 1～2 刻度线之间的第七小格，表示 17Ω（1.7×10）。现在，保持接同样的电阻，开关设在×1 挡，指针将偏转到 15～20 刻度线之间的第二小格，当然还是读出 17Ω，表明给定的电阻值常可在多个开关设置中。然而，每次改变量程，电表都应进行归零，即将两个测量表笔对接并调整指针到零位置。

AC-DC 和 DC mA 刻度　从顶往下第二、三、四条刻度线（标记“DC”和“AC”）合起来用于 DC VOLTS 和 AC VOLTS 功能，上部的 ac-dc 刻度终止于 300 刻度线，用于 0.3、3 和 300 的量程，例如，开关设置在 DC VOLTS 功能的 3，则 300 刻度线的满量程值是 3V；开关设置在 300，则满量程值为 300V。中间的 ac-dc 刻度终止于 60，共同用于 0.06、60 和 600 的量程；再如，开关设置在 DC VOLTS 功能的 60，满量程值是 60V。下方的 ac-dc 刻度终止于 12，共同用于 1.2、12 和 120 的开关设置。三个 DC mA 刻度以同样方法测量电流。

小贴士　使用如图 2-59 所示的模拟万用表时，需要手动选择电压和电流量程，如果测量未知电压或电流，一个很好的实践做法是将万用表设置成最大量程，然后逐步减小量程，直到得到可以接受的读数为止。

【例 2-9】　在图 2-60 中，根据图 2-59 中万用表的开关设置，对于下列每一种开关，请确定所测物理量（电压、电流或电阻）及其数值。

（a）DC VOLTS：60　（b）DC mA：12

（c）OHMS：×1k

解：（a）由中间的 AC-DC 刻度读数为 18V。

（b）由中间的 DC mA 刻度读数为 3.8mA。

（c）由欧姆刻度（顶部）读数为 10kΩ。

相关问题：对于本例的（c）部分，开关拨向欧姆挡×100，假设所测电阻相同，则指针将偏向何处？

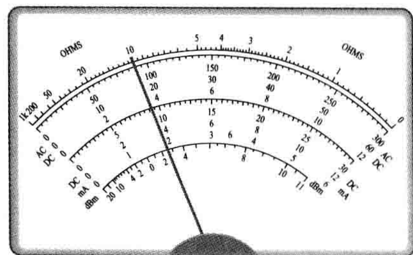


图 2-60　例 2-9 图

本节测试题

1. 给出测量下列物理量的万用表功能。

（a）电流；（b）电压；（c）电阻

2. 在图 2-41 所示的电路中，如何放置两个电流表来测量通过灯泡的电流（一定要注意极

性)。只用一个电流表如何完成相同的测量?
3. 说明如何放置一个电压表测量图2-41所示电路中灯泡2两端的电压。
4. 列出两种常见的DMM显示方式，并讨论它们的优缺点。
5. 给出DMM分辨率的定义。
6. 图2-59所示的模拟万用表设置在3V量程测量直流电压，假设指针指在ac-dc的上刻度150处，则测得的电压是多少?
7. 为测量275V直流电压，应如何设置图2-59所示的万用表?在哪个刻度读取电压?
8. 如果希望用图2-59所示的万用表测量超过20kΩ的电阻，应在哪里设置开关?

本章小结

- 原子是保留元素特征的最小粒子。
- 电子是负电荷的基本粒子。
- 质子是正电荷的基本粒子。
- 离子是获得或失去了一个电子不再保持中性的原子。
- 当原子外层轨道的电子(价电子)挣脱时，它们就变成了自由电子。
- 自由电子可能产生电流。
- 同性电荷相斥，异性电荷相吸。
- 电流存在前必须给电路施加电压。
- 燃料电池与电池利用氧化还原反应将化学能转换为电能。
- 电阻限制电流。
- 电路基本由电源、负载和电流通路组成。
- 断路是一种不含有完整电流通路的电路。
- 闭路是一种含有完整电流通路的电路。
- 电流表接在电流通路线路中(串联)测量电流。
- 电压表跨接在电流通路中(并联)测量电压。
- 欧姆表跨接在电阻器两端测量电阻，电阻器必须从电路中断开。
- 图2-61显示了本章介绍的电气符号。
- 1C是6.25×10^{18}个电子所带的电荷。
- 当把1C电荷从一点移到另一点用了1J能量时，这两点之间的电势差(电压)为1V。
- 在一秒钟内有一库仑电荷流过给定的材料截面时，则电流为一安培。
- 如果给元件施加1V电压，产生1A电流，那么该元件的电阻为1Ω。

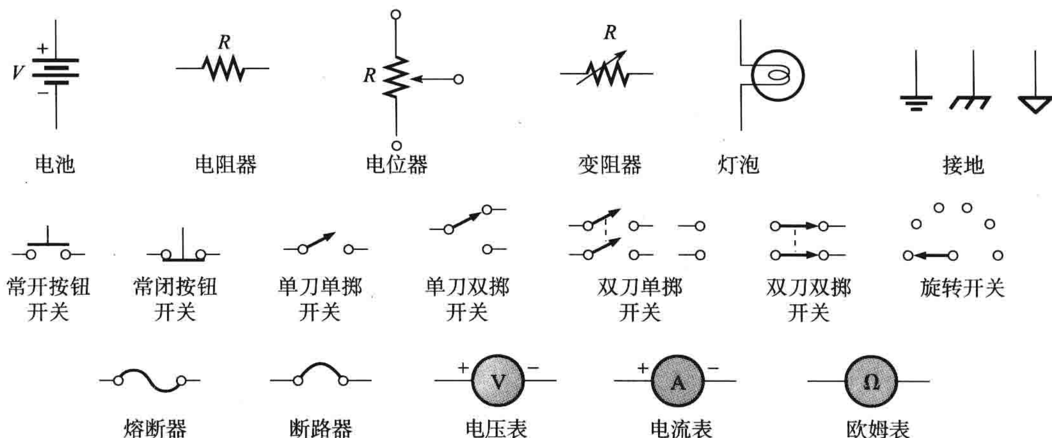


图 2-61

关键术语

电流表(Ammeter) 一种用于测量电流的仪器。

安培(A)(Ampere) 电流的单位。

原子(Atom) 原子是保留元素特征的最小粒子。

美国线规(AWG) 基于导线直径的标准。

电荷(Charge) 物质因为电子的过剩或不足而呈现的电特性，电荷可正可负。

断路器(Circuit breaker) 用于切断电路中过大电流的可复位保护器件。

闭合电路(Closed circuit) 一个存在完整电流通路的电路。

电导（Conductance） 一个电路允许电流流过的能力，单位为西门子（S）。

导体（Conductor） 易于产生电流的材料，例如铜。

库仑（C）（Coulomb） 电荷的单位，6.25×10^{18} 个电子所带电量的总和。

库仑定律（Coulomb's Law） 描述两个带电体之间作用力的定律，指出两个带电体之间的作用力与两电荷之积成正比，与它们之间距离的平方成反比。

电流（Current） 电荷（自由电子）流动的速率。

电流源（Current source） 为任意负载都能提供恒定电流的器件。

数字万用表（DMM） 一种将测量电压、电流和电阻的仪表组合起来的电子仪器。

电子（Electron） 物质中电荷的基本粒子，电子带有负电荷。

自由电子（Free electron） 从原子束缚中挣脱出来的价电子，能在材料的原子结构中从一个原子到另一个原子自由移动。

燃料电池（Fuel cell） 一种将外部供给的电化学能量转换成直流电压的装置。氢燃料电池是最常见的类型。

熔断器（Fuse） 当电路中存在过大电流时熔断的保护装置。

接地（Ground） 电路中的公共点或参考点。

绝缘体（Insulator） 在常规条件下不允许电流通过的材料。

负载（Load） 跨接在电路输出端的元件（电阻器或其他部件），从电源汲取电流并在其中做功。

欧姆（Ω）（Ohm） 电阻的单位。

欧姆表（Ohmmeter） 测量电阻的仪器。

开路（Open circuit） 一种不含有完整电流通路的电路。

电位器（Potentiometer） 三端可调电阻器。

电阻（Resistance） 对电流的阻止能力，单位为欧姆（Ω）。

电阻器（Resistor） 专门设计的具有一定量电阻的电气元件。

变阻器（Rheostat） 二端可调电阻器。

电路原理图（Schematic） 电子或电气电路的符号化结构图。

半导体（Semiconductor） 导电值介于导体和绝缘体之间的材料，硅和锗是两种半导体例子。

西门子（S）（Siemens） 电导的单位。

开关（Switch） 用于接通或断开电流通路的电子或电气元件。

伏特（V）（Volt） 电压或电动势的单位。

电压（Voltage） 将电子从电路中一点移动到另一点，单位电荷所具有的能量。

电压源（Voltage source） 给任意负载提供恒定电压的器件。

电压表（Voltmeter） 测量电压的仪器。

关键公式

(2-1) $Q=\dfrac{\text{电子数量}}{6.25\times10^{18}\ \text{电子}/\text{C}}$　电荷

(2-2) $V=\dfrac{W}{Q}$　电压（伏特）等于能量（焦耳）除以电荷（库仑）。

(2-3) $I=\dfrac{Q}{t}$　电流（安培）等于电荷（库仑）除以时间（秒）。

(2-4) $G=\dfrac{1}{R}$　电导（西门子）为电阻（欧姆）的倒数。

(2-5) $A=d^2$　截面积（圆密耳）等于直径（密耳）的平方。

(2-6) $R=\dfrac{\rho l}{A}$　电阻是电阻率（CM-Ω/ft）乘以长度（英尺）再除以截面积（圆密耳）。

是非测验题

1. 原子核中质子的数量就是元素的原子数。
2. 电荷的单位是安培。
3. 电池中的能量是以化学能的形式储存的。
4. 伏特可以用单位电荷的能量定义。
5. 在五环精度电阻器中，第四环是公差环。
6. 变阻器与电位器功能相同。
7. 应变计随着施加的力的改变而改变其电阻。
8. 导线接头处决不允许焊接。
9. 所有电路必须有电流的完整通路。
10. 圆密耳是面积的单位。
11. 用 DMM 可完成的三种基本测量是电压、电流和功率。

12. 用仪表测量电流，仪表必须串联放置。

自测题

1. 原子数为3的中性原子有多少个电子？
   (a) 1 (b) 3
   (c) 无 (d) 取决于原子种类
2. 电子轨道称为
   (a) 层 (b) 原子核
   (c) 波 (d) 化合价
3. 不能建立电流的材料称为
   (a) 滤波器 (b) 导体
   (c) 绝缘体 (d) 半导体
4. 当带正电荷材料与带负电荷材料靠近放置时，它们将会
   (a) 相斥 (b) 变成中性
   (c) 相吸引 (d) 交换电荷
5. 单个电子的电荷量是
   (a) 6.25×10^{18}C
   (b) 1.6×10^{-19}C
   (c) 1.6×10^{-19}J
   (d) 3.14×10^{-6}C
6. 电位差的另一个术语是
   (a) 能量
   (b) 电压
   (c) 电子与原子核的距离
   (d) 电荷
7. 能量的单位是
   (a) 瓦特 (b) 库仑
   (c) 焦耳 (d) 伏特
8. 下列哪个不是能源？
   (a) 电池 (b) 太阳电池
   (c) 发电机 (d) 电位器
9. 下列哪个是氢燃料电池的副产品？
   (a) 氧 (b) 二氧化碳
   (c) 盐酸 (d) 水
10. 下列哪个是电路中一般不可能出现的？
    (a) 有电压无电流
    (b) 有电流无电压
    (c) 有电压有电流
    (d) 无电压无电流
11. 电流定义为
    (a) 自由电子
    (b) 自由电子流动的速率
    (c) 移动电子所需的能量
    (d) 自由电子的电荷量
12. 电路中没有电流的条件是
    (a) 串联开关闭合
    (b) 串联开关断开
    (c) 没有电压源
    (d) (a) 和 (c)
    (e) (b) 和 (c)
13. 电阻器的主要用途是
    (a) 增加电流
    (b) 限制电流
    (c) 产生热
    (d) 阻止电流变化
14. 电位器和变阻器是下列哪个类型器件
    (a) 电压源
    (b) 可调电阻器
    (c) 固定电阻器
    (d) 断路器
15. 给定电路的电流不超过22A，则下列哪个熔断器数值最佳？
    (a) 10A (b) 25A
    (c) 20A (d) 不需要熔断器

习题

基本习题

2.2 节

1. 50×10^{31}个电子的电荷量是多少？
2. 多少电子的电荷量为80μC？
3. 铜原子的原子核电荷量是多少库仑？
4. 氯原子的原子核电荷量是多少库仑？

2.3 节

5. 确定下列情况的电压值
   (a) 10J/C
   (b) 5J/2C
   (c) 100J/25C
6. 五百焦耳能量用于移动100C电荷通过电阻器，则电阻器两端的电压是多少？
7. 用800J能量移动40C电荷通过电阻器，电池的电压为多少？
8. 汽车的12V电池移动2.5C电荷通过电路，需

要多少能量?

9. 假设太阳电池充电器移动 0.2C 电荷要提供 2.5J 能量，则其电压是多少?

2.4 节

10. 如果在习题 9 中太阳电池移动电荷用了 10s，则电流是多少?
11. 确定下列各种情况的电流
    (a) 1s 内 75C
    (b) 0.5s 内 10C
    (c) 2s 内 5C
12. 6/10 库仑通过一点用时 3s，电流为多少?
13. 如果电流为 5A，则 10C 电荷通过一点需要多长时间?
14. 当电流为 1.5A 时，0.1s 时间通过一点的电荷量是多少库仑?

2.5 节

15. 图 2-62a 所示为色码电阻器，试确定其电阻值及公差。电阻 A 的色环颜色分别为：蓝、灰、红、银；电阻 B 的色环颜色分别为：橙、橙、黑、银；电阻 C 的色环颜色分别为：黄、紫、橙、金。
16. 对图 2-62a 的每个电阻器，在公差限制内确定最大和最小电阻值。
17. (a) 如果需要公差 5%的 270Ω 电阻，应找怎样的色环?
    (b) 在图 2-62b 挑选的电阻器中，选出下列值：330Ω、2.2kΩ、39Ω、56Ω 和 100kΩ。其中，电阻 A 的色环颜色分别为：橙、白、橙、金；电阻 B 的色环颜色分别为：橙、橙、棕、金；电阻 C 的色环颜色分别为：绿、棕、绿、金；电阻 D 的色环颜色分别为：红、红、红、金；电阻 E 的色环颜色分别为：棕、绿、绿、金；电阻 F 的色环颜色分别为：棕、黑、黄、金；电阻 G 的色环颜色分别为：橙、白、黄、金；电阻 H 的色环颜色分别为：橙、白、绿、金；电阻 I 的色环颜色分别为：绿、蓝、红、金；电阻 J 的色环颜色分别为：黄、紫、黄、金；电阻 K 的色环颜色分别为：白、棕、红、金；电阻 L 的色环颜色分别为：绿、蓝、橙、金。

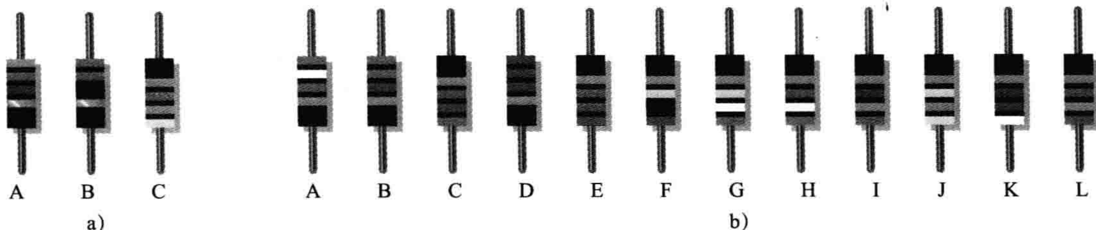


图 2-62　习题 15、16、17 图

18. 试确定图 2-63 中各电阻器的电阻值及公差。(a) 中电阻的色环颜色分别为：橙、蓝、绿、金、红；b) 中电阻的色环颜色分别为：红、紫、黄、橙、蓝；c) 中电阻的色环分别为：灰、红、绿、红、棕。

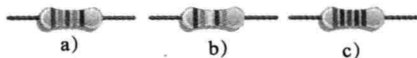


图 2-63　习题 18 图

19. 确定下列四环电阻器的电阻值及公差。
    (a) 棕、黑、黑、金
    (b) 绿、棕、绿、银
    (c) 蓝、灰、黑、金
20. 确定下列四环电阻器的色环，假定公差都是 5%。
    (a) 0.47Ω
    (b) 270kΩ
    (c) 5.1MΩ
21. 确定下列五环电阻器的电阻值及公差。
    (a) 红、灰、紫、红、棕
    (b) 蓝、黑、黄、金、棕
    (c) 白、橙、棕、棕、棕
22. 确定下列五环电阻器的色环，假定公差都是 1%。
    (a) 14.7kΩ　　(b) 39.2Ω
    (c) 9.76kΩ
23. 确定用下列标签表示的电阻值。
    (a) 220　　(b) 472
    (c) 823　　(d) 3K3
    (e) 560　　(f) 10M
24. 线性电位器的可调触点置于机械中点，如果总电阻为 1000Ω，则可调触点与每个端点之间的电阻是多少?

2.6节

25. 在图2-41a所示的灯泡电路中，开关接通中间和下部两个引脚，画出电流通路。
26. 对应图2-41b所示开关的两个位置，加接熔断器以保护电路防止过流，重新画出电路。

2.7节

27. 在图2-64所示的电路中，试放置电流表和电压表测量电流和电源电压。
28. 说明如何测量图2-64所示电路中电阻R_2的电阻值。

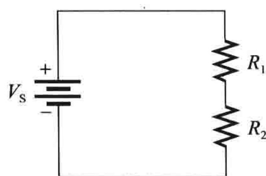


图2-64　习题27、28图

29. 在图2-65中，开关在位置"1"和"2"时每个电压表的指示值分别是多少？

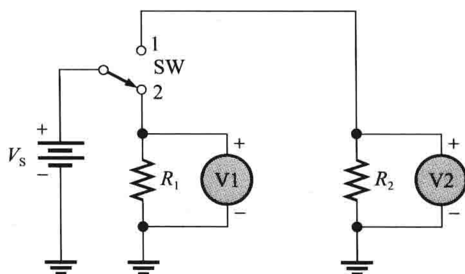


图2-65　习题29、30图

30. 在图2-65中，说明如何放置电流表测量电压源的电流，不管开关在何位置。
31. 图2-66所示仪表的电压读数是多少？
32. 图2-67中仪表测得的电阻是多少？

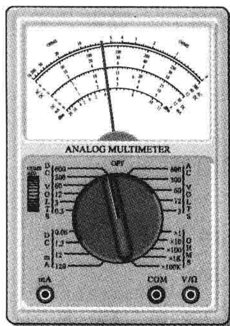


图2-66　习题31图

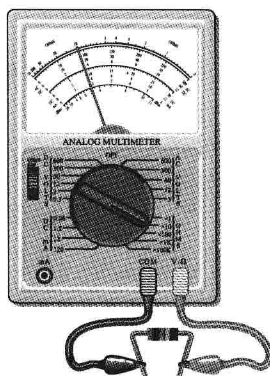


图2-67　习题32图

33. 对应下列欧姆表的读数及量程设置，试确定电阻值。
    (a) 指针在2，量程为$R\times100$
    (b) 指针在15，量程为$R\times10M$
    (c) 指针在45，量程为$R\times100$
34. 万用表有下列量程：1mA、10mA、100mA；100mV、1V、10V；R×1、R×10、R×100，简要说明在图2-68所示的电路中测量如下物理量应如何连接万用表。

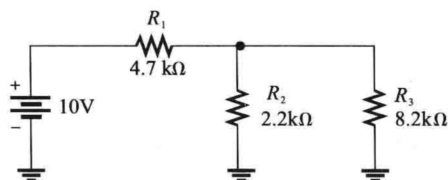


图2-68　习题34图

(a) I_{R_1}　　(b) V_{R_1}　　(c) R_1

每种情况下指出万用表的功能及量程设置。

高级习题

35. 放大器电路中某电阻器电流2A，在15s内将1000J电能转换为热能，试问电阻器两端的电压是多少？
36. 如果574×10^{15}个电子在250ms内通过导线，则电流为多少安培？
37. 120V电源经两段长导线连接1500Ω阻性负载，如图2-69所示。电压源距负载50ft，如果要求两段导线的总电阻不超过6Ω，利用表2-3确定最细导线的规格号。

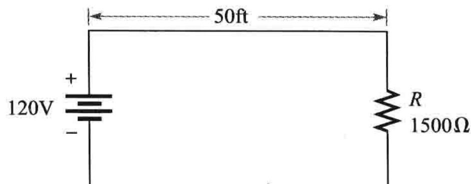


图2-69　习题37图

38. 试确定下列标签电阻器的电阻及公差。
    (a) 4R7J　　(b) 560KF　　(c) 1M5G
39. 图2-70中只有一个电路可能使所有灯泡同时点亮，试确定是哪一个电路。
40. 在图2-71中，不管开关位置如何，哪个电阻器中始终有电流？
41. 在图2-71中，要测量流过每个电阻器及电池的电流，说明电流表的正确接法。

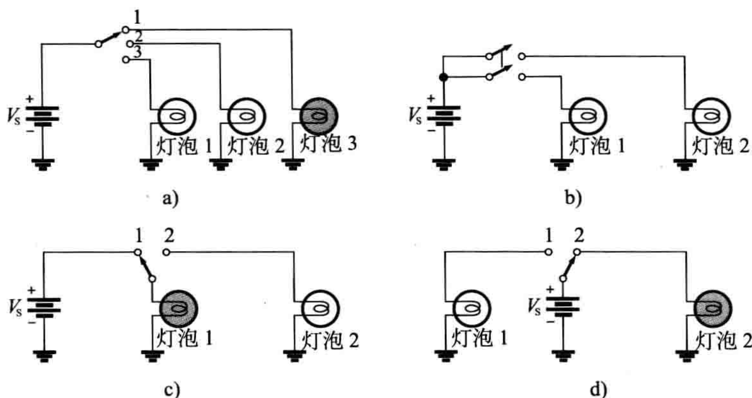


图 2-70　习题 39 图

42. 在图 2-71 中，要测量每个电阻器两端的电压，说明电压表的正确接法。

43. 请设计一个开关装置，以使两个电压源 V_{S_1} 和 V_{S_2} 可同时按下述方式连接两个电阻（R_1 和 R_2）：

(a) V_{S_1} 接电阻 R_1，V_{S_2} 接电阻 R_2

(b) V_{S_1} 接电阻 R_2，V_{S_2} 接电阻 R_1

44. 如果答案的正确序列是 D-B-C-A，说明如何给图 2-46 中的测试板接线。

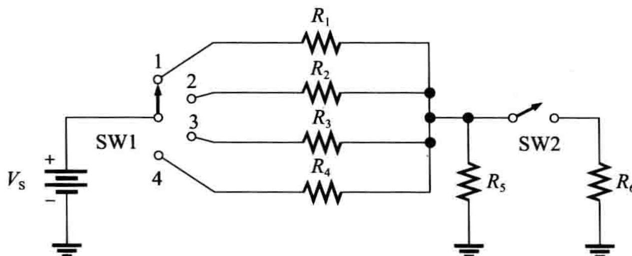


图 2-71　习题 40、41、42 图

各节测试题答案

2.1 节

1. 电子是带负电荷的基本粒子。
2. 原子是保持元素特征的最小粒子。
3. 原子由一个带正电荷原子核与围绕原子核运动的电子构成。
4. 原子序数就是原子核中质子的数量。
5. 否，每一元素都有不同的原子种类。
6. 自由电子是从父原子游离出来的外层电子。
7. 电子层是电子绕原子核运动的能带。
8. 铜和银。

2.2 节

1. 电荷的符号是 Q。
2. 电荷的单位是库仑，符号为 C。
3. 电荷的两个种类是正电荷与负电荷。
4. $Q = \dfrac{10\times10^{12}\text{ 电子}}{6.25\times10^{18}\text{ 电子}/\text{C}} = 1.6\times10^{-6}\text{C} = 1.6\mu\text{C}$

2.3 节

1. 电压是单位电荷所具有的能量。
2. 电压的单位是伏特。
3. $V = W/Q = 24\text{J}/10\text{C} = 2.4\text{V}$
4. 电池、燃料电池、直流电源、太阳电池、发电机、热电偶和压电式传感器都是电压源。
5. 氧化还原反应。

2.4 节

1. 电流是电荷流动的速率，单位为安培（A）。
2. 一库仑电荷有 6.25×10^{18} 个电子。
3. $I = Q/t = 20\text{C}/4\text{s} = 5\text{A}$

2.5 节

1. 电阻是阻止电流流动的能力，单位为欧姆（Ω）。
2. 电阻器的两个分类是固定电阻器和可调电阻器。固定电阻器的电阻值不能改变，而可调电阻器

的电阻值可以改变。

3. 第一环：电阻值的第一位数字；
   第二环：电阻值的第二位数字；
   第三环：第二位数字后面零的个数；
   第四环：百分数公差。
4. (a) 黄、紫、红、金＝4700Ω±5%
   (b) 蓝、红、橙、银＝62 000Ω±10%
   (c) 棕、灰、黑、金＝18Ω±5%
   (d) 红、红、蓝、红、绿＝22.6kΩ±0.5%
5. (a) 33R＝33Ω
   (b) 5K6＝5.6kΩ
   (c) 900＝900Ω
   (d) 6M8＝6.8MΩ
6. 变阻器只有两端，电位器有三个端子。
7. 热敏电阻——温度；光电导——光；应变计——力。

2.6节

1. 一个基本电路由电源、负载及电源与负载之间的电流通路组成。
2. 断开电路（或开路）不含有电流通路。
3. 闭合电路含有完整的电流通路。
4. $R=\infty$（无穷大）；$R=0\Omega$。
5. 熔断器保护电路防止过流。
6. 一旦熔断，必须更换熔断器，而断路器跳闸后可以复位。
7. AWG#3 比 AWG#22 大。
8. 接地是相对于其他点具有零电位的参考点。

2.7节

1. (a) 电流表测量电流。
   (b) 电压表测量电压。
   (c) 欧姆表测量电阻。
2. 见图2-72。

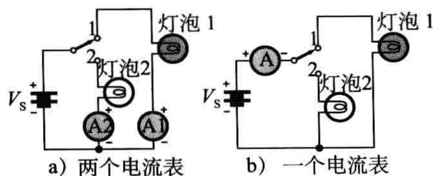


图2-72 习题2答案图

3. 见图2-73。

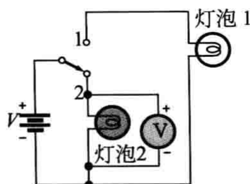


图2-73 习题3答案图

4. DMM的两种显示方式为LED和LCD。LCD所需电流很小，但在光线弱时读数困难，反应速度慢；LED能在黑暗条件下读数，反应速度快，但所需的电流比LCD大得多。
5. 分辨率是一个仪表能够测量的物理量的最小增量。
6. 被测电压为1.5V。
7. 设置成DC VOLTS 600；在60刻度线上靠近中点处读出275V。
8. OHMS×1000。

例题中相关问题答案

例2-1 1.88×10^{19}个电子

例2-2 600J

例2-3 12C

例2-4 4700Ω±5%

例2-5 47.5Ω±2%

例2-6 1.2kΩ

例2-7 404.01CM；#24

例2-8 1.28Ω；与计算结果相同。

例2-9 指针将指在最上面刻度的100处。

是非测验题答案

1.F 2.F 3.T 4.T 5.F 6.F 7.T 8.F 9.T 10.T 11.F 12.T

自测题答案

1. (b) 2. (a) 3. (c) 4. (c) 5. (b) 6. (b) 7. (c) 8. (d) 9. (d) 10. (b)
11. (b) 12. (e) 13. (b) 14. (b) 15. (c)

第3章 欧姆定律、能量与功率

本章目标

- 解释欧姆定律
- 利用欧姆定律确定电压、电流和电阻
- 定义能量与功率
- 计算电路的功率
- 根据输入功率限制，正确选择电阻器
- 解释能量转换和电压降
- 讨论电源与电池的特性
- 描述故障排除的基本方法

乔治·西蒙·欧姆（Georg Simon Ohm，1787—1854）通过实验发现，电压、电流和电阻以一种特定的关系相关联，这一基本关系称为欧姆定律，欧姆定律是电气电子领域最基本最重要的定律之一。本章将介绍欧姆定律，讨论其在实际电路中的应用，并通过大量例子演示其应用。

除了欧姆定律，本章还要介绍电路和系统中能量与功率的概念和定义，给出计算功率的瓦特定律，最后介绍用分析、规划和测量（APM）法进行故障排除的一般方法。

3.1 欧姆定律

欧姆定律用数学方法描述电路中电压、电流和电阻的相互关系。欧姆定律可以写成三个等价形式，可根据需要确定的物理量来决定所使用的公式。

学习完本节内容，应该能够

- 解释欧姆定律；
- 说明电压（V）、电流（I）和电阻（R）的相互关系
- 将 I 表示为 V 和 R 的函数；
- 将 V 表示为 I 和 R 的函数；
- 将 R 表示为 V 和 I 的函数。

欧姆通过实验确定，如果电阻两端电压增加，则通过电阻的电流也将增加；反之，如果电阻两端电压减小，则通过电阻的电流也将减小。例如，如果电压加倍，电流也加倍；如果电压减半，电流同样也减半。这一关系如图 3-1 所示，图中相应的电表指示了电压与电流的关系。

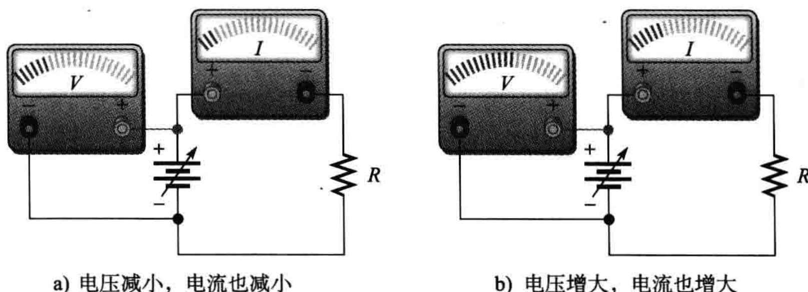
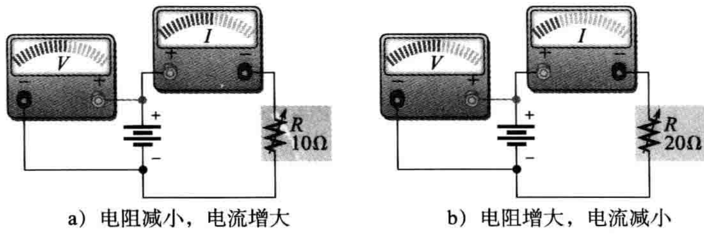


图 3-1　电阻恒定时电压变化对电流的影响

欧姆同样确定，当电压维持恒定时，减小电阻将导致电流增大，而增大电阻则电流减小。例如，如果电阻减半，则电流加倍；如果电阻加倍，则电流减半。图 3-2 中电表的指示说明了这一关系，其中电压保持恒定，而电阻增大。



a）电阻减小，电流增大　　b）电阻增大，电流减小

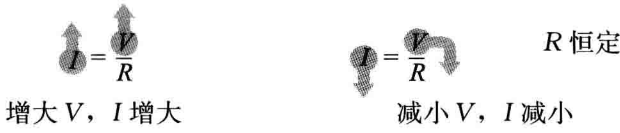
图 3-2 电压保持恒定时电阻变化对电流的影响

欧姆定律表明，电流与电压成正比，与电阻成反比。

$$I = \frac{V}{R} \tag{3-1}$$

式中，I 是电流，单位为安培（A）；V 是电压，单位为伏特（V）；R 是电阻，单位为欧姆（Ω）。这个公式描述了图 3-1 和图 3-2 中电路之间的关系。

对于恒定的电阻，如果电路的电压增大，则电流也增大；电压减小，电流也减小。



对于恒定的电压，如果电路的电阻增大，则电流将减小；如果电阻减小，电流将增大。



增大 R，I 减小　　减小 R，I 增大

【例 3-1】 利用欧姆定律公式（3-1），验证当电压从 5V 增大到 20V 时流过 10Ω 电阻时电流的增加。

解：对于 V=5V，

$$I = \frac{V}{R} = \frac{5\text{V}}{10\Omega} = 0.5\text{A}$$

对于 V=20V，

$$I = \frac{V}{R} = \frac{20\text{V}}{10\Omega} = 2\text{A}$$

相关问题：电压恒定为 10V，当电阻从 5Ω 增大到 20Ω 时，试表明电流的减小。

欧姆定律还能用另一等价形式表述。在公式（3-1）两边同时乘以 R，等式两边交换，得到欧姆定律的等价形式：

$$V = IR \tag{3-2}$$

有了这个公式，如果已知电流（单位为安培）和电阻（单位为欧姆），就可以计算出电压（单位为伏特）。

【例 3-2】 利用欧姆定律公式（3-2），计算当电流为 5.0mA 时，1.0kΩ 电阻两端的电压。

解：
$$V = IR = 5.0\text{mA} \times 1.0\text{k}\Omega = 5.0\text{V}$$

相关问题：当电流为 1mA 时，试求 1.0kΩ 电阻两端的电压。

还有第三种等价形式表述欧姆定律，在式（3-2）两边同时除以 I，然后等式两边交换，得到下式：

$$R=\frac{V}{I} \tag{3-3}$$

欧姆定律的这个公式用于已知电压（单位为伏特）和电流（单位为安培）时确定电阻值（单位为欧姆）。

记住，三个表达式——式（3-1）、式（3-2）和式（3-3）是互相等价的，它们是表述欧姆定律的三种简单方法。

【例 3-3】 利用欧姆定律公式（3-3），计算汽车后窗除霜器网格的电阻。当接 12.6V 电池时，电池吸取 15.0A 电流，除霜器网格的电阻是多少？

解：
$$R=\frac{V}{I}=\frac{12.6\text{V}}{15.0\text{A}}=840\text{m}\Omega$$

相关问题：如果有一条网格线断开，电流降为 13.0A，则新的电阻是多大？

电流和电压的线性关系

在电阻性电路中，电压和电流成线性比例关系。假设电阻值是恒定不变的，线性意味着如果一个量以一定百分比增大或减小，则另一个量也将以相同的百分比增大或减小。例如，电阻器两端电压增大两倍，则电流也增大两倍；如果电压减半，电流也将减半。

【例 3-4】 在图 3-3 所示的电路中，说明如果电压增大到现有值的三倍，电流将增大到三倍。

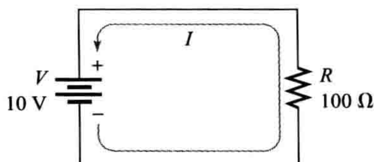


图 3-3

解： 电压为 10V 时，电流为

$$I=\frac{V}{R}=\frac{10\text{V}}{100\Omega}=0.1\text{A}$$

如果电压增至 30V 时，电流将为

$$I=\frac{V}{R}=\frac{30\text{V}}{100\Omega}=0.3\text{A}$$

当电压增大到三倍后达 30V 时，电流从 0.1A 变到了 0.3A。

相关问题：如果图 3-3 中电压翻了两番增至四倍，电流也将增至四倍吗？

我们取一个恒定的电阻值，例如 10Ω，对图 3-4a 电路中电压在 10～100V 范围内的若干值计算对应的电流值，得到的电流值如图 3-4b 所示，I 值与 V 值的对应关系如图 3-4c 所示。

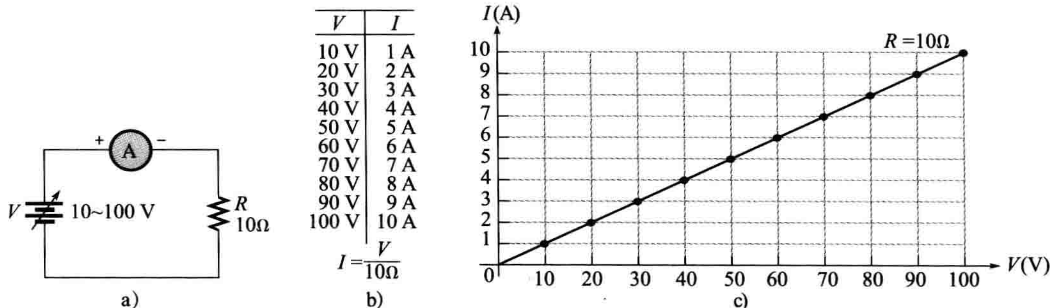


图 3-4 电路电流与电压的关系图

注意，这是一条直线图。该图表明，电压的变化引起电流呈线性比例变化，而不管电阻 R 为何值。只要假定 R 是常数，那么 I 对 V 的图形总是一条直线。

欧姆定律的图示

图 3-5 所示的图示有助于欧姆定律的应用，也是记忆公式的一种方法。

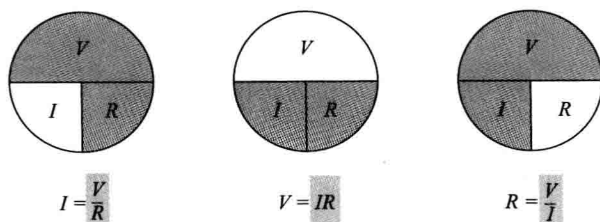


图 3-5 欧姆定律公式的图示

本节测试题

1. 用文字简要说明欧姆定律。
2. 写出计算电流的欧姆定律公式。
3. 写出计算电压的欧姆定律公式。
4. 写出计算电阻的欧姆定律公式。
5. 如果电阻两端电压增至三倍，电流增大还是减小？增大或减小多少？
6. 在可变电阻两端有一固定电压，测得电流为10mA，如果电阻加倍，则测得的电流将是多大？
7. 在线性电路中，电压和电阻都加倍，电流会发生什么变化？

3.2 欧姆定律的应用

本节提供了若干欧姆定律应用的例子，用于计算电路中的电压、电流和电阻，同样将看到在电路计算中如何使用公制前缀来表示物理量。

学习完本节内容，应该能够

- 利用欧姆定律确定电压、电流和电阻；
- 当已知电压和电阻时，利用欧姆定律计算电流；
- 当已知电流和电阻时，利用欧姆定律计算电压；
- 当已知电压和电流时，利用欧姆定律计算电阻；
- 使用带公制前缀的物理量。

3.2.1 电流计算

在下面的例题中，将学习在电压和电阻值已知的情况下，如何确定电流。这些问题中使用公式 $I=V/R$。为了得到以安培表示的电流值，电压值须以伏特表示，而电阻值要以欧姆表示。

【例 3-5】 某指示灯需要一个330Ω电阻限制电流，限流电阻上的电压为3V，该电阻的电流是多少？

解：

$$I=\frac{V}{R}=\frac{3.0\text{V}}{330\Omega}=9.09\text{mA}$$

相关问题：如果电阻改为270Ω，电压仍然是3.0V，电流将如何变化？

电子学中，电阻值常常是数千或数百万欧姆，这时，可应用公制前缀千（k）和兆（M）来表示大电阻值，因而，千欧姆表示成千欧（kΩ），百万欧姆表示是成兆欧（MΩ）。下面的例子将演示在应用欧姆定律计算电流时如何使用千欧与兆欧。

【例 3-6】 以毫安为单位计算图3-6所示电路中的电流。

解： 1.0kΩ与 $1.0\times10^3\Omega$ 相同，应用公式 $I=V/R$，将 V 替换为50V，R 替换为 $1.0\times10^3\Omega$。

$$I=\frac{V_\text{S}}{R}=\frac{50\text{V}}{1.0\text{k}\Omega}=\frac{50\text{V}}{1.0\times10^3\Omega}=50\times10^{-3}A=50\text{mA}$$

相关问题：如果图 3-6 中电阻增大为 10kΩ，那以电流是多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E03-06，连接万用表到电路，验证本例所计算的电流值。

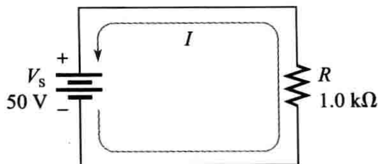


图　3-6

在例 3-6 中电流表示成 50mA，因此，当伏特（V）除以千欧（kΩ）时，电流就是毫安（mA）。当伏特（V）除以兆欧（MΩ）时，电流就是微安（μA），如例 3-7 所示。

【例 3-7】　确定图 3-7 所示电路的微安电流量。

解：4.7MΩ 等于 $4.7\times10^6\Omega$，应用公式 $I=V/R$，将 V 替换为 25V，R 替换为 $4.7\times10^6\Omega$。

$$I=\frac{V_S}{R}=\frac{25\text{V}}{4.7\text{M}\Omega}=\frac{25\text{V}}{4.7\times10^6\Omega}=5.32\times10^{-6}\text{A}=5.32\mu\text{A}$$

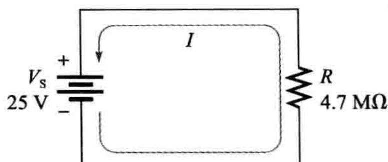


图　3-7

相关问题：如果图 3-7 中电阻减小为 1.0MΩ，那么电流是多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E03-07，连接万用表到电路，验证本例所计算的电流值。

电子电路中电压常常比较小，通常小于 50V，然而，偶尔也会碰到大电压，例如，无线电发射机的高压电源、等离子枪、离子发动机、X 光机中电压通常远高于 1000V。电力公司所产生的输电电压可能会高达345 000V（345kV）。

【例 3-8】　当 50kV 加在 100MΩ 电阻两端时，流过该电阻的电流为多少微安？

解：50kV 除以 100MΩ 得电流。在电流公式中，用 50×10^3V 替代 50kV，用 $100\times10^6\Omega$ 替代 100MΩ，V_R为电阻两端电压。

$$I=\frac{V_R}{R}=\frac{50\text{kV}}{100\text{M}\Omega}=\frac{50\times10^3\text{V}}{100\times10^6\Omega}=0.5\times10^3\text{A}=500\times10^{-6}\text{A}=500\mu\text{A}$$

相关问题：如果给 10MΩ 电阻加 2kV 电压，试问电流是多少？

3.2.2　电压计算

在下面的例子中，将学习在电流和电阻值已知的情况下，如何利用公式 $V=IR$ 确定电压。为了得到以伏特表示的电压值，电流值须以安培表示，而电阻值要以欧姆表示。

【例 3-9】　在图 3-8 所示的电路中，需要多大电压才能产生 5A 的电流？

解：在公式 $V=IR$ 中，将 I 替换为 5A，R 替换为 100Ω。

$$V_S=IR=5\text{A}\times100\Omega=500\text{V}$$

因此，要产生 5A 流过 100Ω 电阻器的电流，需要 500V 电压。

相关问题：在图 3-8 所示的电路中，产生 8A 电流需要多少电压？

【例 3-10】　在图 3-9 中，电阻两端测得的电压将是多少？

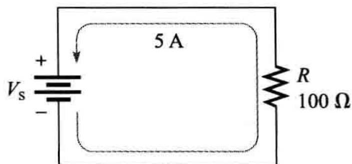


图　3-8

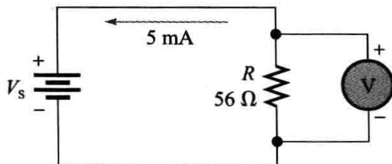


图　3-9

解： 注意，5mA 等于 5×10^{-3}A，将 V 和 R 数值代入公式 $V=IR$。

$$V_R = IR = 5\text{mA}\times 56\Omega = 5\times10^{-3}\text{A}\times 56\Omega = 280\text{mV}$$

当毫安乘以欧姆时，结果为毫伏。

相关问题：将图 3-9 中的电阻改为 22Ω，试确定产生 10mA 电流所需要的电压。

【例 3-11】 图 3-10 所示的电路中有 10mA 电流，试问电压源的电压是多少？

解： 注意，10mA 等于 10×10^{-3}A，3.3kΩ 等于 $3.3\times10^{3}\Omega$，将数值代入公式 $V=IR$。

$$V_S = IR = 10\text{mA}\times 3.3\text{k}\Omega = 10\times10^{-3}\text{A}\times 3.3\times10^{3}\Omega = 33\text{V}$$

当毫安与千欧相乘时，结果为伏特。

相关问题：如果电流为 5mA，试问图 3-10 中的电压是多少？

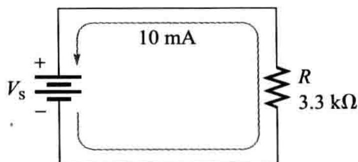


图 3-10

【例 3-12】 某小型太阳电池连接 27kΩ 电阻器，明亮的阳光下太阳电池类似电流源向电阻器提供 180μA 的电流，如图 3-11 所示。试问，电阻两端的电压是多少？

解： $V_R = IR = 180\mu\text{A}\times 27\text{k}\Omega = 4.86\text{V}$

相关问题：在多云条件下电流降为 40μA，试问电压如何变化？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E03-12，电阻两端跨接电压表，确认本例计算出的电压。

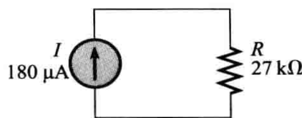


图 3-11

3.2.3 电阻计算

在下面的例题中，将学习在电压和电流已知的情况下，如何利用公式 $R=V/I$ 确定电阻值。为了得到以欧姆表示的电阻值，电压值须以伏特表示，而电流要以安培表示。

【例 3-13】 汽车灯从 13.2V 电池吸取 2A 电流，试问灯泡电阻是多少？

解：
$$R = \frac{V}{I} = \frac{13.2\text{V}}{2.0\text{A}} = 6.6\Omega$$

相关问题：当工作电压为 6.6V 时，同样的灯泡吸取电流为 1.1A。这种情况下，试问灯泡电阻是多少？

【例 3-14】 硫化镉电池（CdS 电池）是一种当光照射时改变电阻的光敏电阻，用在如黄昏开灯等应用中。当该电池接在图 3-12 所示设置的有源电路中时，可以从电流表间接监视电阻，电流表显示的读数代表的电阻是多少？

解：
$$R = \frac{V}{I} = \frac{3.0\text{V}}{1.58\text{mA}} = 1.90\text{k}\Omega$$

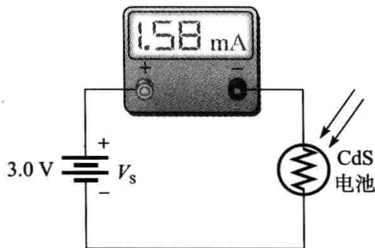


图 3-12

相关问题：黑暗情况下电流降到 76μA，这表示电阻是多少？

系统举例 3-1 电流感应电阻器

电流感应电阻器是低阻值精密电阻器，被广泛应用于各种系统，包括电源、电池充电电路、电机控制器、汽车系统、通信和计算机。由欧姆定律所述，当有电流流过电阻器时，在其两端就有电压降，电流感应电阻器将电流转换成一个可以方便测量和监控的小电压。大多数使用的高精度表面贴装电阻如图 3-13 所示。



图 3-13 表面贴装电流感应电阻器

电流感应电阻器具有低电阻值以降低功耗和自热效应，低阻值也确保

由于插入损耗对电路的影响最小，最常见的电阻值在20～25mΩ。

电流感应电阻器的一个应用是电池充电器，这是一种典型的电源。图3-14是一个设计用来调节电池充电器电流的简化电路图，电流感应电阻器是本例的重点。从电源出来的电流被转换成一个小的电压，由控制器（一片小集成电路）对这个电压进行监控，控制器基于最佳充电曲线调节电流量，使充电器更加高效和可靠。

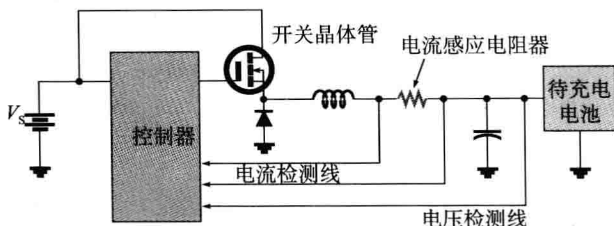


图3-14 使用电流感应电阻器监控充电电流的电池充电电源系统

本节测试题

1. $V=10\text{V}$，$R=4.7\Omega$，求I。
2. 如果给4.7MΩ电阻加20kV电压，将有多少电流存在？
3. 10kV电压加在2kΩ电阻上，产生的电流是多少？
4. $I=1\text{A}$，$R=10\Omega$，求V。
5. 在3kΩ电阻中产生3mA电流需要加多少电压？
6. 一电池给6Ω负载电阻产生了2A电流，试问电池的电压是多少？
7. $V=10\text{V}$，$I=2\text{A}$，求R。
8. 在立体声放大电路中，一电阻器两端测得的电压为25V，电流表指示流过该电阻器的电流为50mA，那么该电阻值为多少千欧？合多少欧姆？

3.3 能量与功率

当有电流通过电阻时，电能将转化为热能或其他形式的能，如光能。最常见的例子是白炽灯泡变得烫手，由于灯丝具有电阻，因而电流通过灯丝产生光的同时还产生不必要的热量。在给定的时间内，电气元件必须能消耗一定量的能量。

学习完本节内容，应该能够

- 定义能量与功率；
- 借助能量与时间表示功率；
- 说出功率的单位；
- 说出能量的常用单位；
- 完成能量与功率的计算。

能量就是做功的能力，而功率则是使用能量做功的速率。换句话说，功率P是一定时间长度（t）内能量W的量，用数学式子表示为

$$P=\frac{W}{t} \tag{3-4}$$

其中，P是功率，单位为瓦特（W）；W是能量，单位为焦耳（J）；t是时间，单位为秒（s）。注意，斜体字符W用来表示能量，而正体W是功率的单位瓦特，焦耳是SI制中的能量单位。

能量（焦耳）除以时间（秒）给出功率（瓦特），例如，2s时间内用掉50J能量，功率为50J/2s=20W。根据定义，**1W表示在1s内用掉1J能量的功率量。**

因此，1s用掉的焦耳数总是等于功率的瓦特数。例如，如果1s用掉75J，则功率是$P=\frac{W}{t}=\frac{75\text{J}}{1\text{s}}=75\text{W}$。

在某些电子学领域，功率的量常常远小于一瓦特，与小电流和小电压使用公制前缀一样，

小功率也用公制前缀来表达，所以，在一些应用中常常使用毫瓦（mW）与微瓦（μW）。

而在电力设施领域，千瓦（kW）和兆瓦（MW）则是常用单位，无线电广播和电视台同样用大功率传输信号，电动机还常用马力（ph）作额定功率，这里 1ph=746W。

由于功率是能量使用的速率，因此一段时间内使用的功率表示能源消耗。如果功率（瓦特）乘以时间（秒），得到能量（焦耳），用符号 W 表示。即

$$W=Pt$$

【例 3-15】 在 5s 内用掉 100J 能量，试问功率是多少瓦特？

解：

$$P=\frac{能量}{时间}=\frac{W}{t}=\frac{100\text{J}}{5\text{s}}=20\text{W}$$

相关问题：如果 100W 功率持续工作 30s，试问用掉多少焦耳的能量？

千瓦时（kWh）——电量的单位

焦耳已被定义为能量（电量）的单位，但是，还有另一种表达电量的方式。由于以瓦特为单位表示功率，可以以小时为单位表示时间，因此，电量可以使用千瓦时（kWh）为单位。

支付电费时以所使用的能量收费，由于电力公司需处理的能量很大，最实用的单位是千瓦时。功率为 1000 瓦的电器工作 1 小时相当于使用了一千瓦时[⊖]的电量。例如，一个 100W 的电视 10 小时使用 1kWh 的电量。

$$W=Pt=100\text{W}\times10\text{h}=1000\text{Wh}=1\text{kWh}$$

【例 3-16】 对下列各种能量消耗，计算千瓦时（kWh）数。

（a）1400W 持续 1h （b）2500W 持续 2h （c）100 000W持续 5h

解：（a）1400W=1.4kW

$W=Pt=1.4\text{kW}\times1\text{h}=1.4\text{kWh}$

（b）2500W=2.5kW

能量=2.5kW×2h=5kWh

（c）1000 000W=100kW

能量=100kW×5h=500kWh

相关问题：如果 250W 的灯泡点亮 8h，试问用去多少千瓦时的电量？

表 3-1 列出了几种常见家用电器的典型额定功率瓦特数，将表 3-1 的额定功率转换成千瓦，再乘以使用的小时数，就可以确定各种电器的最大千瓦时（kWh）数。

表 3-1 电器的额定功率

电器	额定功率/W	电器	额定功率/W
空调机	860	微波炉	800
吹风机	1000	炉灶	12 200
时钟	2	冰箱	500
烘干机	4000	电视机	250
洗碗机	1200	洗衣机	400
暖气机	1322	热水器	2500

【例 3-17】 在典型的 24h 内，以指定的时间长度使用以下电器：

空调机，15h； 吹风机，10min； 时钟，24h；

烘干机，1h； 洗碗机，45min； 微波炉，15min；

⊖ 一千瓦时又称为一度电。——译者注

冰箱，12h；　电视机，2h；　热水器，8h。

确定总的千瓦时数和该时间段的电费，费率是每千瓦时11美分。

解：将表3-1的瓦特转换为千瓦，然后再乘以时间的小时数，就可确定每个电器所使用的千瓦时（度）数。

空调机：0.860kW×15h=12.9kWh

吹风机：1.0kW×0.167h=0.167kWh

时钟：0.002kW×24h=0.048kWh

烘干机：4.0kW×1h=4.0kWh

洗碗机：1.2kW×0.75h=0.9kWh

微波炉：0.8kW×0.25h=0.2kWh

冰箱：0.5kW×12h=6kWh

电视机：0.25kW×2h=0.5kWh

热水器：2.5kW×8h=20kWh

现在，把所有电器的千瓦时数加起来得到24h总的用电量。

总电量=（12.9+0.167+0.048+4.0+0.9+0.2+6.0+0.5+20)kWh=44.7kWh

以11美分/千瓦时电价计，24h所有电器所用电费为

电费=44.7kWh×0.11＄/kWh=＄4.92

相关问题：除了上面电器，假如还使用200W的加湿器2h、75W的加热垫3h，试计算24h所有用电的电费。

本节测试题

1. 给出功率的定义。
2. 写出用能量和时间表示功率的公式。
3. 给出瓦特的定义。
4. 用最合适的单位表示下列各个功率值。
   (a) 68 000W
   (b) 0.005W
   (c) 0.000 025W
5. 如果100W功率使用10h，则用去的电能（以千瓦时计）是多少？
6. 试将2000W转换为千瓦数。
7. 如果电价是每千瓦时11美分，那么使用暖气机（1332W）24h的电费是多少？

3.4 电路中的功率

电流流过电路中的电阻，将电能转换为热能，这在电路里通常是不希望的副产品。然而，在某些情况下，产生热却是电路的主要目的，例如，电阻加热器。在任何情况下，都必须经常处理电气和电子电路功率。

学习完本节内容，应该能够

- 计算电路的功率；
- 已知I和R确定功率；
- 已知V和I确定功率；
- 已知V和R确定功率。

当有电流通过一个电阻时，电子通过电阻的运动发生碰撞而放出热，导致电能转化为热能，如图3-15所示。电路中消耗的功率取决于电阻的量和电流的量，表示如下：

$$P=I^2R \tag{3-5}$$

式中，P是功率，单位为瓦特（W）；R是电阻，单位为欧姆（Ω）；I是电流，单位为安培（A）。

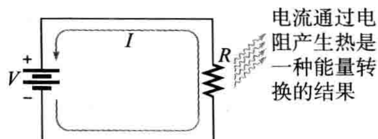


图3-15 电路的功耗被视为电阻的发热，功耗与电压源提供的功率相等

将I^2替换为$I\times I$，然后用V替代IR，可得用电压和电流表示的等价的功率表达式。

$$P=I^2R=(I\times I)R=I(IR)=(IR)I \tag{3-6}$$
$$P=VI$$

用 V/R 替代 I（欧姆定律），得到另一个等价表达式。

$$P = VI = V\left(\frac{V}{R}\right)$$
$$P = \frac{V^2}{R} \tag{3-7}$$

式（3-5）、式（3-6）、式（3-7）表示的三个功率表达式称为瓦特定律。根据已知信息，可以用瓦特定律的功率公式之一计算电路中电阻的功率。例如，假设已知电流和电压值，这时用公式 $P=VI$ 计算功率；如果已知 I 和 R，使用公式 $P=I^2R$；如果已知 V 和 R，使用公式 $P=\frac{V^2}{R}$。

本章小结部分给出了欧姆定律和瓦特定律的使用辅助。

【例 3-18】 计算图 3-16 中三个电路的功率。

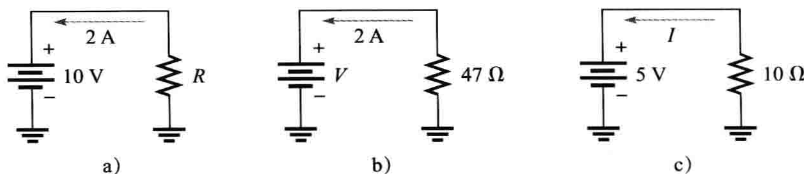


图 3-16

解：电路 a）中已知 V 和 I，功率确定如下：

$$P=VI=10\text{V}\times2\text{A}=20\text{W}$$

电路 b）中已知 I 和 R，因此，

$$P=I^2R=(2\text{A})^2\times47\Omega=188\text{W}$$

电路 c）中已知 V 和 R，因此，

$$P=\frac{V^2}{R}=\frac{(5\text{V})^2}{10\Omega}=2.5\text{W}$$

相关问题：做如下改变后再确定图 3-16 中各电路的功率：电路 a）中 I 加倍而 V 保持不变；电路 b）中 R 加倍而 I 保持不变；电路 c）中 V 减半而 R 保持不变。

【例 3-19】 如图 3-17 所示的太阳能庭院灯含有一个太阳能收集器，可提供 1.0W 的功率为 3.0V 电池充电。试问，太阳能收集器可以向完全放电的 3.0V 电池提供的最大充电电流为多少？

解：
$$I=\frac{P}{V}=\frac{1.0\text{W}}{30\text{V}}=0.33\text{A}$$

相关问题：如果夜间电流为 30mA，则该灯消耗的功率是多少？



图 3-17

本节测试题

1. 假设车窗除霜器接 13.0V 电压，电流为 12A，试问除霜器消耗的功率是多少？
2. 如果 5A 电流通过一个 47Ω 的电阻器，试问消耗的功率是多少？
3. 许多示波器有一个 50Ω 的输入位置，输入端与地之间设置一个 2W/50Ω 的电阻器。试问，在超过该电阻额定功率之前可以施加到输入端的最大电压是多少？
4. 假设汽车座椅加热器内部电阻为 3.0Ω，如果电池的电压为 13.4V，则该加热器消耗的功率是多少？
5. 试问给 2.2Ω 电阻加 8V 电压所产生的功率

是多少？

其电阻是多少？

6. 一个 55W 的灯泡吸取 0.5 A 的电流，试问

3.5　电阻器的额定功率

我们知道，当有电流通过时电阻器将散发出热量，对电阻器所能散发的热量存在一定的限制，这由其额定功率来确定。

学习完本节内容，应该能够

- 根据功率条件恰当地选择电阻器；
- 给出额定功率的定义；
- 解释如何由电阻器的物理特性决定其额定功率；
- 用欧姆表检查电阻器故障。

额定功率是一个电阻器能够散热不会因积聚过多热量而损坏的最大功率。额定功率主要由电阻器的物理组成、大小和形状决定，而与欧姆值（电阻）无关。所有其他条件相同时，电阻器的表面积越大可耗散的功率也越大。圆筒形电阻器的表面积等于长度（l）乘以周长（c），如图 3-18 所示，其中两端的面积未包括在内。

安全提示　在正常运行中，某些电阻会变得非常热。为避免灼伤，电源接在电路上时不能接触电路元件。切断电源后，要等一段时间让元件冷却下来。

金属膜电阻器的标准额定功率从 1/8～1W，如图 3-19 所示。其他类型电阻器的额定功率有所不同，例如，线绕电阻器可具有高达 225W 或更高的额定功率。图 3-20 为部分电阻器示例。

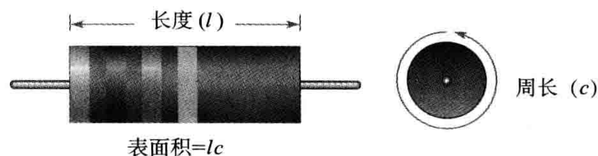


图 3-18　电阻器的额定功率直接与其表面积相关

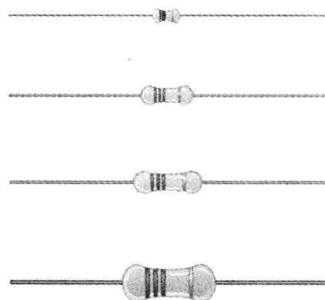


图 3-19　标准额定功率 1/8W、1/4W、1/2W、1W 的金属膜电阻器的相对大小

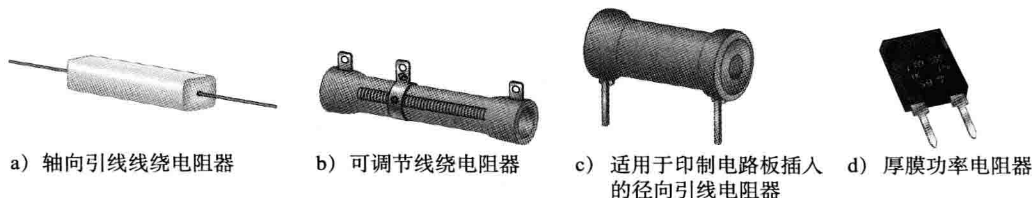
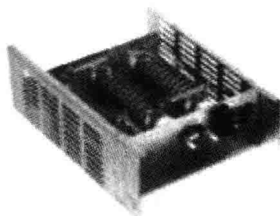


图 3-20　典型大额定功率电阻器

系统注释：制动电阻器

当电动机需要完全停止时，使用数千瓦额定功率的功率电阻器作为制动电阻器。电动机转

动时具有动能。例如，运动的电梯具有很大的能量，当电梯要停在某一层时，必须消散这一动能，当电梯的电机断电后，由于惯性电动机还将继续旋转，若要快速、平稳地停止电动机的转动，将一个特殊的大功率制动电阻开关接到电动机两端，制动电阻器将运动系统的能量消耗为热量。通常需为制动电阻器安装散热器，以帮助散热。



系统举例3-2 负载测试箱

大多数制造商都对其产品样本实行质量控制，以确保每一个测试的产品都符合规格，然后才将其交付给顾客。在许多情况下，质量测试中使用专门设计的测试夹具。假设制造商需要在其最大额定输出下测试四种不同的电源：5.0V@1.0A、8.0V@500mA、10V@100mA和15V@100mA，这时需要一组可选的电阻器，让技术人员测试在各种负载下电源是否可以正常工作。本例中，设计了一个电阻测试盒选用库存电阻器来满足需求。

1）确定电阻值。当该电阻接到电源时，将提供所需的负载和功率。由欧姆定律可知，对应每种电源，所需的电阻值为

对于5.0V电源：$R=V/I=5.0\text{V}/1.0\text{A}=5.0\Omega$

对于8.0V电源：$R=V/I=8.0\text{V}/0.50\text{A}=16\Omega$

对于10V电源：$R=V/I=10\text{V}/0.10\text{A}=100\Omega$

对于15V电源：$R=V/I=15\text{V}/0.10\text{A}=150\Omega$

2）确定每个电阻器的预计功率量。根据瓦特定律，每个电源的预计功耗为

对于5.0V电源：$P=VI=5.0\text{V}\times1.0\text{A}=5.0\text{W}$

对于8.0V电源：$P=VI=8.0\text{V}\times0.50\text{A}=4.0\text{W}$

对于10V电源：$P=VI=10\text{V}\times0.10\text{A}=1.0\text{W}$

对于15V电源：$P=VI=15\text{V}\times0.10\text{A}=1.5\text{W}$

为安全起见，指定的电阻器应至少有高于其额定功率20%的余量，以防电源电压高于预计值。电阻器的额定功率取决于电阻器的类型和所需的功率容限。假设可选的额定功率分别为1.0W、2.0W、5.0W、10W，则应选择如下电阻器：

对于5.0V电源：$R=5.0\Omega$，$P=5.0\text{W}$，选$P_{(额定)}=10\text{W}$

对于8.0V电源：$R=16\Omega$，$P=4.0\text{W}$，选$P_{(额定)}=5.0\text{W}$

对于10V电源：$R=100\Omega$，$P=1.0\text{W}$，选$P_{(额定)}=2.0\text{W}$

对于15V电源：$R=150\Omega$，$P=1.5\text{W}$，选$P_{(额定)}=2.0\text{W}$

3）指定熔丝并列出位置。熔丝必须足以承受预计的最大电流（1A），熔丝合理的选择是1.5 A。最终的设计如图3-21所示。要完成整个箱制作，零件清单包括印制电路板、元件和硬件物品（箱子、螺丝、旋钮等）。

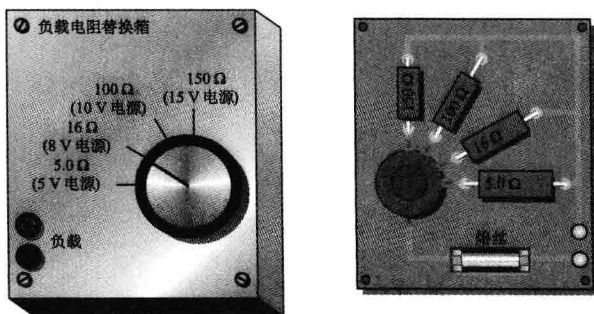


图3-21 负载测试箱顶视图和印制电路板

当一个电阻器的功耗大于其额定值时，电阻将变得过热，其结果是电阻器可能会烧坏断路或其电阻值可能严重改变。

通常可以观察其表面是否烧焦或外观是否变形来检测电阻是否因过热而损坏，如果看不出来，但怀疑一个电阻损坏了，可以用欧姆表检查其电阻值是否开路或阻值增大。回想一下，要测量电阻值，电阻器应从电路断开，有

时电阻过热是由于电路中另一个故障引起，过热的电阻器更换后，恢复电路的电源之前应考察其根本原因。

【例 3-20】 试确定图 3-22 所示的各个电路中哪个电阻器可能因过热而损坏。

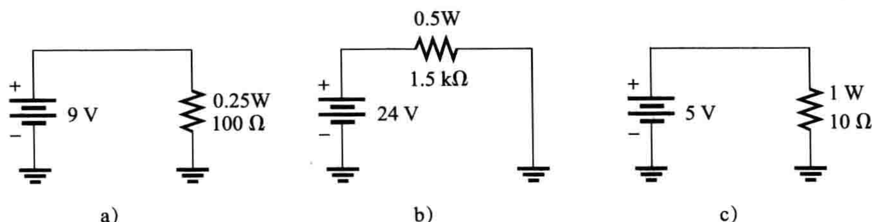


图 3-22 例 3-20 电路图

解：对于图 3-22a 电路，

$$P=\frac{V^2}{R}=\frac{(9\text{V})^2}{100\Omega}=0.81\text{W}$$

电阻的额定功率是 1/4W（0.25W），不足以承受功率，电阻器过热可能烧坏导致其开路。

对于图 3-22b 所示的电路，

$$P=\frac{V^2}{R}=\frac{(24\text{V})^2}{1.5\text{k}\Omega}=0.384\text{W}$$

电阻的额定功率是 1/2W（0.5W），足以承受功率。

对于图 3-22c 电路，

$$P=\frac{V^2}{R}=\frac{(5\text{V})^2}{10\Omega}=2.5\text{W}$$

电阻的额定功率是 1W，不足以承受功率，电阻器过热可能烧坏导致其开路。

相关问题：一个 1/2W、1.0kΩ 的电阻器接到 12V 电池上，是否会过热？

本节测试题

1. 给出与电阻器相关的两个重要参数。
2. 如何由电阻器的物理尺寸确定其能承受的功率？
3. 列出金属膜电阻器的标准额定功率。
4. 一个电阻器必须承受 0.3W 功率，该用何种标准尺寸的金属膜电阻器？
5. 若不超过额定功率，那么加到 1/4W、100Ω 电阻器两端的最大电压是多大？

3.6 电阻中的能量转换与电压降

我们已经学过，当有电流通过一个电阻时，电能被转换成热能，热能是由电阻材料原子结构内的自由电子碰撞所产成的，碰撞发生时，释放出热量；随着在材料中运动，电子丢失其获得的部分能量。

学习完本节内容，应该能够

- 解释能量转换与电压降；
- 讨论电路中能量转换的原因；
- 给出电压降的定义；
- 说明能量转换与电压降之间的关系。

图 3-23 说明了电子形式的电荷从电池的负极端流出，通过电路，返回到电池的正极端。从负极端出来时电子具有最高的能级，电子流经电流通路中的每个电阻器（这种连接称为串

联，将在第4章学习）。随着电子流过每个电阻器，会释放一部分能量，因此，电子进入电阻器时的能量比流出电阻器时多，在图中用红颜色的深度变浅来表示。电子流经电路回到电池正极端时具有最低的能级。

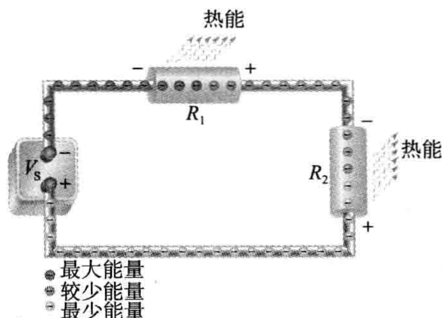


图 3-23　因为电压等于能量除以电荷，所以流过电阻时电子（电荷）的能量损失产生电压降

回想一下，电压等于单位电荷的能量（$V=W/Q$），而电荷是电子的属性。基于电池的电压，一定量的能量被施加到从负极端流出的电子，电子流过整个电路中各点时的数目相同，但随着电子通过电路中的电阻，它们的能量逐步减小。

在图 3-23 中，R_1 左端的电压等于 $W_{进入}/Q$，R_1 右端的电压等于 $W_{离开}/Q$，进入和离开 R_1 的电子数量相同，所以 Q 不变，但 $W_{离开}$ 小于 $W_{进入}$，因此，R_1 右端的电压小于 R_1 左端的电压。由于能量损失造成的电阻器两端电压的这种减小称为*电压降*。R_1 右端的电压比 R_1 左端的电压高，电路中用“－”和“＋”号标记电压降（“＋“表示电压高）。

电子在 R_1 中损失了一些能量，然后以较低的能级进入 R_2，当电子流过 R_2 时，进一步失去能量，在 R_2 两端产生另一个电压降。

系统注释　集成电路温度传感器

发热是许多电子系统的克星，非接触式集成电路（IC）的温度传感器能测量红外能量，可用于存在发热问题而空间有限的应用系统。温度传感器用在传感元件、信号调理、模拟-数字转换器（ADC）和参考电源方面，它们被全部放在单一的 IC 封装中，简化了连续时间段的数据采集和温度数据记录。



照片和图片由福禄克公司提供

本节测试题

1. 电阻中能量转换的根本原因是什么？
2. 什么是电压降？
3. 电压降的极性与电流方向的关系是什么？

3.7　电源与电池

回顾 2.3 节简要介绍的电压源类型——电源和电池，*电源*通常被定义为一种将从市电得到的 ac（alternating current，交流电）转换成 dc（direct current，直流）电压的装置，几乎所有的电子电路和某些传感器都需要这种电源。电池同样能够提供直流。事实上，许多系统中，如笔记本电脑，既可以用电源也可以使用内置电池运行。本节将介绍这两种类型的电压源。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论电源和电池的特性；
- 说明典型实验室电源的控制；
- 给定输入和输出功率确定电源效率；
- 定义电池的额定安时值。

由于交流电能方便地转换为用于传输的高电压和最终用户使用的低电压，所以，市电普遍采用 ac 从发电站向用户输送电力。采用高电压长距离输电具有更高的效率和经济效益。在美国，提供给家庭用户的标准电压为 120V/60Hz 或 240V/60Hz，而在欧洲和其他一些国家则是 240V/50Hz。

几乎所有的电子系统都需要稳定的直流供电，以使集成电路和其他器件正常工作。直流稳压电源实现了将交流电转换为稳定的直流电压这个功能，电源通常内置在产品中。许多电子系统设有一个凹进去受保护的开关，可以将内部电源设置成120V标准或240V标准，该开关必须正确设置，否则可能严重损坏设备。

在实验室进行电路的开发与测试，实验室电源的用途是提供测试电路所需要的稳定直流，而测试电路五花八门，从简单的电阻网络到复杂的放大器或逻辑电路。为了满足几乎没有噪声和纹波的恒定电压要求，实验室电源应是稳压电源，即如果因为线路的电压或负载变化而使输出试图改变，则不断对输出进行感测和自动调整，维持输出稳定。

许多电路需要多个电压，以及将电压设置到一个精确的值，或微调电压用于测试。出于这个原因，实验室电源通常有两个或三个彼此独立的可以单独控制的输出。输出指示通常是一个良好的实验室电源的一部分，用以设置和监视输出电压或电流。控制可包括细调和粗调或用数字输入设定精确的电压。

图3-24显示了一个三路输出台式电源，如在许多电子实验室所使用的类型。该型号电源有两个独立的0～30V电源和一个4～6.5V高电流电源（通常称为逻辑电源）。利用粗、细调节可精确设置电压。0～30V电源具有浮动输出，即没有接地，这样允许用户将其设置成正电源或负电源，甚至可将其连接到另一外部电源。这种电源的另一个特点是可以被设置为电流源，恒流使用时具有最大电压设定。

许多电源的输出有三个0～30V香蕉插孔，在红色（正）和黑色端之间输出，绿色插孔被接到机壳并接地。既可红色插孔接地也可以黑色插孔接地，这就是所谓的“浮动”（不以地为参考）。此外，内置的数字仪表用于监控输出电流和电压。



图3-24 三路输出电源
（图片由B&K Precision公司提供）

电源提供的功率为电压和电流绝对值的乘积。例如，如果一个电源提供－15.0V/3.0A输出时，所提供的功率为45W。对于三路输出电源，三路电源提供的总功率是每个电源单独提供功率之和。

【例3-21】 如果各路输出如下所示，试问三路电源提供的总功率是多少？

其中，电源1：18V/2.0A；电源2：－18V/1.5A；电源3：5.0V/1.0A。

解： 每一路电源提供的功率为电压与电流的乘积。

对于电源1：$P_1 = V_1 I_1 = 18\text{V} \times 2.0\text{A} = 36\text{W}$

对于电源2：$P_2 = V_2 I_2 = 18\text{V} \times 1.5\text{A} = 27\text{W}$

对于电源3：$P_3 = V_3 I_3 = 5.0\text{V} \times 1.0\text{A} = 5.0\text{W}$

总功率为

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 = 36\text{W} + 27\text{W} + 5.0\text{W} = 68\text{W}$$

相关问题：如果电源1的电流增至2.5A，则总功率将如何变化？

3.7.1 电源效率

电源的一个重要特征是效率。效率定义为输出功率P_{OUT}与输入功率P_{IN}的比值。

$$\text{效率} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \tag{3-8}$$

效率常常用百分数来表示，例如，输入功率为100W，输出功率为50W，则效率为(50W)/(100W)×100%=50%。

所有的电子电源就是一个能量转换器，为了输出功率，必须给它输入功率。例如，电子电源可能从墙上的插座得到交流功率作为输入，而输出通常是稳压直流电压。由于电源内部电路工作将使用一部分输入功率，因此，电源的输出功率总是小于输入功率，内部功率消耗一般称为功率损耗，输出功率等于输入功率减去功率损耗。

$$P_{OUT} = P_{IN} - P_{LOSS} \tag{3-9}$$

高效率意味着电源内部消耗的功率非常小，对于给定的输入功率，输出功率所占比例高。

【例 3-22】 某电子电源需要 25W 输入功率，能够输出 20W 功率，试问该电源的效率是多少？功率损耗是多少？

解：

$$效率 = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{20W}{25W} = 0.8$$

表示为百分数

$$效率 = \frac{20W}{25W} \times 100\% = 80\%$$

$$P_{LOSS} = P_{IN} - P_{OUT} = 25W - 20W = 5W$$

相关问题：某电源的效率为 92%，如果 P_{IN}为 50W，则 P_{OUT}为多少？

3.7.2 电池的额定安时值

电池将其存储的化学能转换为电能，广泛用于小功率系统的直流供电，如笔记本电脑、手机等。这些小系统所使用的电池通常是可充电电池，这意味着其中的化学反应可以由外部电源加以逆转。对于可充电电池，额定安时（Ah）是电池充电前的容量。额定安时确定了电池在额定电压下可提供一定量电流的时间长度。

一安时额定值是指：在额定电压输出下，电池可以给负载提供一小时平均一安培的电流，同样的电池能给负载提供平均二安培电流半小时。电池需要提供的电流越大，电池的寿命就越短。在实践中，电池通常在特定的电流水平和输出电压下标定。例如，12V 汽车电池在 3.5A 电流水平标定为 70Ah，意味着它可以在额定电压下提供 20 小时平均 3.5A 的电流。

【例 3-23】 如果电池额定安时为 70Ah，试问该电池能提供 2A 电流多少小时？

解： 额定安时为电流乘以小时数 x

$$70\text{Ah} = (2\text{A}) \times (x\text{h})$$

解方程得到小时数 x

$$x = \frac{70\text{Ah}}{2\text{A}} = 35\text{h}$$

相关问题：某电池提供 10A 电流 6h，试问该电池的最小额定安时为多少？

本节测试题

1. 当负载装置从电源吸取的电流增加时，这种变化表示电源上的负载更大还是更小？
2. 电源产生 10V 输出电压，如果电源向负载提供 0.5A 电流，则输出功率是多少？
3. 若电池的额定安时为 100Ah，那么该电池能向负载提供 5A 电流多长时间？
4. 如果问题 3 的电池是一个 12V 器件，则对于指定的电流值其输出功率是多少？
5. 实验室使用的电源输入功率为 1W，能够提供 750mW 的输出功率，试问电源的效率是多少？

3.8 故障排除简介

技术人员必须能够诊断并修复出现故障的电路和系统，本节将用一个简单的例子学习排除故障的一般方法。故障排除覆盖率是本书的一个重要组成部分，所以，在许多章都有一节故障排除，同时设置故障排除问题作为技能训练。

学习完本节内容，应该能够

- 说明故障排除的基本方法；
- 列出故障排除的三个步骤；
- 说明半分法的含义；
- 讨论并比较电压、电流和电阻的三种基本测量。

故障排除是在对电路和系统工作透彻了解的基础上，结合逻辑思维的应用去纠正故障。故障排除的基本方法包括三个步骤：分析、规划和测量。我们将这三步方法简记为 APM。

3.8.1 分析

电路故障排除的第一个步骤是分析故障的线索或征兆。分析可以从确定对某些问题的答案开始：

1. 该电路正常工作过吗?
2. 如果电路曾经工作过，那么是在什么条件下出现问题的?
3. 故障的征兆是什么?
4. 故障的可能原因是什么?

小贴士　在对 PC 板上新制造电路进行故障排除时，某些故障可能与已经工作过的电路不同，例如，在新电路中可能不慎用错元件或安装时引脚弯曲，由于元件错误将在一系列新制造的电路板上导致相同的故障。

3.8.2 规划

分析线索后，进行故障排除过程的第二个步骤：制订一个排除的逻辑计划。通过适当的规划可以节省很多时间。电路的工作知识是故障排除计划的先决条件，如果不清楚电路如何工作，需花时间审查电路图（原理图)、操作说明以及其他相关信息，在各个测试点标记正确电压值的电路原理图特别有用。虽然逻辑思维也许是进行故障排除的最重要工具，但是仅凭逻辑思维很少能解决问题。

3.8.3 测量

第三步是通过深思熟虑的测量缩小可能出现故障的范围。这些测量通常确认当前解决问题的方向是否正确，或者指出应该考虑新方向，有时还会发现意想不到的结果。

3.8.4 APM 举例

用一个简单的例子说明 APM 方法中的思维过程。假设有一串八个 15V 装饰灯泡串联到 120V 电源 V_S上，如图 3-25 所示。设该电路正常工作了一段时间，但移到新的位置后停止工作，插到新的位置时灯泡无法点亮，怎么发现故障呢?

分析思维过程　可仿照下面的情况进行分析：

- 由于在移动前电路正常工作过，因此，问题可能出在新的位置上没有电压。

- 移动时导线可能松动和拉脱。
- 灯泡可能烧毁或从灯座脱落。

根据这一推理，能够考虑到可能的原因和可能发生的故障，继续思维过程：

- 该电路曾经正常工作过的事实消除了原电路接线不当的可能性。
- 如果故障由断路造成，可能有一个以上的断点，可能是一个损坏连接或烧坏的灯泡。

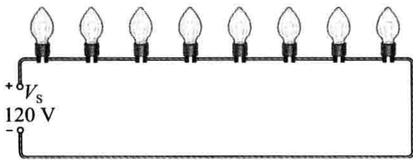


图 3-25 一串灯泡连接到电压源

现在已经分析了问题，可以着手计划在电路中查找故障的过程。

规划思维过程 计划的第一部分是在新的位置测量电压。如果电压存在，那么问题就在灯串上；如果电压不存在，则检查房间配电箱中的断路器。复位断路器之前，应该想想断路器为什么会跳闸。我们假设电压是存在的，这意味着问题在灯串。

计划的第二部分是测量灯串的电阻或测量灯泡两端的电压。测量电阻或是测量电压无一定规则，可以根据测试的难易程度决定。很少能一开始就制订出完备的覆盖所有可能出现的突发故障的排除计划，因此，需要不断修改计划。

测量过程 继续计划的第一部分，在新的位置用万用表检查电压。假设测量显示电压为120V，可以排除没有电压的可能性。由于在灯串两端有电压，而灯泡没亮，所以没有电流流过灯泡，因此，在电流路径中一定有断路，要么有灯泡烧坏，要么灯座的连接损坏或者导线损坏。

接下来，决定通过用万用表测量电阻来定位断点。运用逻辑思维，决定测量一半灯串的电阻。而不是每个灯泡的电阻。通过每次测量一半灯泡的电阻，通常可以减少找到断点所需要的尝试，这是一种故障排除过程的技术，称为半分法。

一旦某一半灯串的电阻为无穷大，则可确定断点就在这一串灯中，然后，对于这一半灯串继续用半分法查找，如此继续下去，直到将故障范围缩小到一个故障灯泡或连接。这个过程如图 3-26 所示。为了便于说明问题，假设第七个灯泡烧坏了。

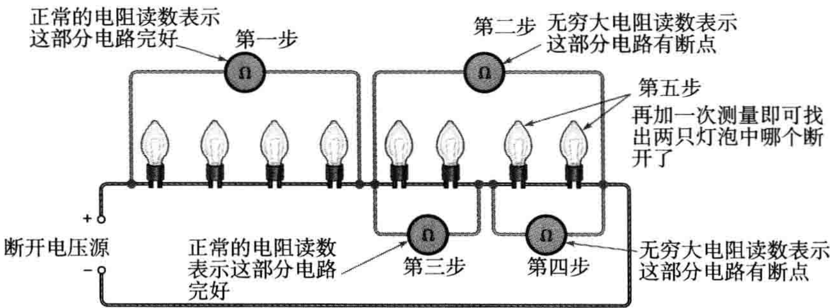


图 3-26 半分法故障排除演示。编号的步骤表示万用表从一个位置移到另一个的顺序

由图 3-26 可见，在这种特殊情况下，半分法至多需要五次测量就能确定断路的灯泡。如果你打算从左边开始逐个测量每个灯泡，则需要七次测量才能定位断点。所以，有时分半法可以节省步骤，但有时却不能。所需要的步骤数取决于从哪里以何种顺序开始测量。

不幸的是，大部分故障排除比这个例子困难得多。然而，在任何情况下，分析和规划是有效的故障排除所必不可少的。随着测量的进行，不断修改规划。经验丰富的故障排除人员通过将征兆与测量拟合到可能的原因来缩小搜索范围。在某些情况下，当故障排除及维修成本与更换设备成本相当时，低成本的设备将被简单地丢弃或回收利用。

3.8.5 *V*、*R*、*I* 测量的比较

在 2.7 节介绍了电路中电压、电流或电阻的测量。为了测量电压，需将电压表并联跨接在元件两端，即将一个测试笔接在元件的每一端。电压测量是三种测量中最简单的。

要测量电阻，需将欧姆表跨接在元件两端，不过，必须首先断开电压，有时还必须将元件从电路中拆出来。因此，一般测量电阻比测量电压要困难。

要测量电流，应将电流表与元件串联连接。也就是说，电流表必须插入到电流路径线路中。要做到这一点，接入电流表前必须先断开元件的引脚或导线。因此，测量电流通常是最困难的。

本节测试题

1. 给出故障排除的 APM 方法中三个步骤的名称。
2. 说明半分法的基本思想。
3. 为什么在电路中测量电压比测量电流容易？

本章小结

- 电压和电流成线性比例关系。
- 欧姆定律给出了电压、电流和电阻的关系。
- 电流与电阻成反比。
- 千欧（kΩ）表示一千欧姆。
- 兆欧（MΩ）表示一百万欧姆。
- 微安（μA）表示百万分之一安培。
- 毫安（mA）表示千分之一安培。
- 用 $I=V/R$ 计算电流。
- 用 $V=IR$ 计算电压。
- 用 $R=V/I$ 计算电阻。
- 一瓦特等于每秒一焦耳。
- 瓦特是功率的单位，焦耳是能量的单位。
- 电阻器的额定功率确定了其能够安全工作的最大功率。
- 物理尺寸大的电阻器比尺寸小的电阻器能够耗散更多发热形式的功率。
- 电阻器的额定功率应高于它在电路中可能承受的最大功率。
- 额定功率与电阻值无关。
- 电阻器过热或损坏通常断路。
- 能量等于功率乘以时间。
- 千瓦时是电能的单位。
- 一千瓦时的例子是一千瓦特使用一小时。
- 电源是为电子、电气器件供电的能源。
- 电池是一种将化学能转换为电能的电源。
- 电源将商业能源（来自电力公司的交流）转换为各种电压等级的稳定直流电压。
- 电源的输出功率等于输出电压乘以负载电流。
- 负载是一种从电源吸取电流的器件。
- 电池的容量用安时（Ah）测量。
- 一个安时等于一安培使用一小时，或安培与小时的任意组合，只要其乘积为一。
- 高效率电源比低效率电源的功率损失百分比小。
- 图 3-27 所示的公式轮子给出了欧姆定律和瓦特定律的关系。

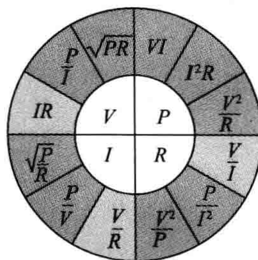


图3-27 表示欧姆定律和瓦特定律关系的公式轮

- APM（分析、规划和测量）给出了故障排除的逻辑方法。
- 故障排除的半分法通常能减少测量次数。

关键术语

额定安时（Ah rating） 由电池向负载提供的电流与持续时间相乘确定的电池额定容量。

效率（Efficiency） 电路输出功率与输入功率的比值，通常用百分比表示。

能量（Energy） 做功的能力，单位为焦耳（J）。

半分法（Half-splitting） 一种故障处理步骤，从

电路或系统的中间开始，根据第一次的测量，决定下一步是向输出端还是向输入端去查找故障。

焦耳（J）（Joule） SI制能量单位。

千瓦时（Kilowatt-hour，kWh） 主要由电力公司采用的大能量单位。

线性（Linear） 具有直线特性的关系。

欧姆定律（Ohm's law） 电流、电压与电阻的关系定律。电流与电压成正比，与电阻成反比。

功率（Power） 能量使用的速率，单位为瓦特（W）。

额定功率（Power rating） 电阻器不被过多的热量积聚而损害的最大功率。

电源（Power supply） 将市电的交流电转换成直流电压的器件。

故障排除（Troubleshooting） 对电路或系统的故障隔离、识别和纠正的系统过程。

电压降（Voltage drop） 由于能量损失而导致的电阻器两端的电压减小。

瓦特（W）（Watt） 功率单位，1W表示在1s时间内使用了1J能量的功率。

瓦特定律（Watt's law） 说明功率与电流、电压和电阻关系的定律。

关键公式

(3-1) $I=\frac{V}{R}$ 计算电流的欧姆定律形式

(3-2) $V=IR$ 计算电压的欧姆定律形式

(3-3) $R=\frac{V}{I}$ 计算电阻的欧姆定律形式

(3-4) $P=\frac{W}{t}$ 功率等于能量除以时间

(3-5) $P=I^2R$ 功率等电流的平方乘以电阻

(3-6) $P=VI$ 功率等于电压乘以电流

(3-7) $P=\frac{V^2}{R}$ 功率等于电压的平方除以电阻

(3-8) $效率=\frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$ 电源效率

(3-9) $P_{OUT}=P_{IN}-P_{LOSS}$ 输出功率

是非测验题

1. 如果电路的总电阻增大，则电流减小。
2. 求电阻的欧姆定律是 $R=V/I$。
3. 毫安与千欧相乘时，得到伏特。
4. 如果10kΩ电阻接到10V电源上，电阻中的电流将是1A。
5. 千瓦时是功率的单位。
6. 1瓦特等于1焦耳每秒。
7. 电阻的额定功率总是小于其在电路中需要的功率消耗。
8. 在负载变化的一定范围内，稳压电源能够自动保持输出电压恒定。
9. 负电压输出的电源从负载吸取功率。
10. 分析电路问题时，应该考虑是在什么条件下出的故障。

自测题

1. 欧姆定律指出
   (a) 电流等于电压乘以电阻
   (b) 电压等于电流乘以电阻
   (c) 电阻等于电流除以电压
   (d) 电压等于电流的平方乘以电阻
2. 若电阻两端电压加倍，则电流将
   (a) 三倍 (b) 减半
   (c) 加倍 (d) 不变
3. 如果将10V电压加到20Ω电阻器两端，则电流为
   (a) 10A (b) 0.5A
   (c) 200A (d) 2A
4. 当1.0kΩ电阻中流过10mA电流时，电阻两端的电压为
   (a) 100V (b) 0.1V
   (c) 10kV (d) 10V
5. 若20V电压加到电阻器两端，形成6.06mA的电流，则电阻值为
   (a) 3.3kΩ (b) 33kΩ
   (c) 330Ω (d) 3.03kΩ
6. 250μA电流通过4.7kΩ电阻产生的电压降是
   (a) 53.2V (b) 1.175mV
   (c) 18.8V (d) 1.175V
7. 若2.2MΩ电阻接到1kV电源两端，产生的电流近似为
   (a) 2.2 mA (b) 455μA

(c) 45.5μA　(d) 0.455 A

8. 功率定义为
   (a) 能量　(b) 热
   (c) 使用能量的速率
   (d) 使用能量所需的时间
9. 电压为 10V，电流为 50mA，则功率为
   (a) 500mW　(b) 0.5W
   (c) 500 000μW　(d) 答案 (a)、(b) 和 (c)
10. 若流过 10kΩ 电阻的电流为 10mA，则功率为
   (a) 1W　(b) 10W
   (c) 100mW　(d) 1mW
11. 若 2.2kΩ 电阻消耗 0.5W，则电流为
   (a) 15.1mA　(b) 227μA
   (c) 1.1mA　(d) 4.4mA
12. 若 330Ω 电阻消耗 2W 功率，则电压为
   (a) 2.57V　(b) 660V
   (c) 6.6V　(d) 25.7V
13. 电阻器需要承受 1.1W，其额定功率应该是
   (a) 0.25W　(b) 1W
   (c) 2W　(d) 5W
14. 一个 22Ω/0.5W 的电阻器和一个 220Ω/0.5W 的电阻器都接到 10V 电源上，试问哪个电阻器会过热？
   (a) 22Ω　(b) 220Ω
   (c) 两个都过热　(d) 两个都不热
15. 当模拟式欧姆表的指针指向无穷大时，所测电阻为
   (a) 过热　(b) 短路
   (c) 断路　(d) 反向

故障排除：征兆与原因

参考图 3-28，给每一组征兆确定原因。

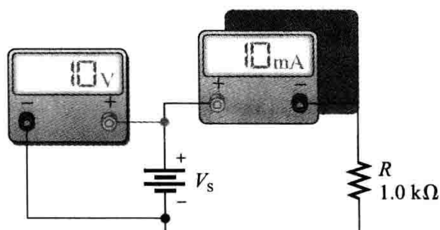


图 3-28　电表指示电路的正确读数

1. 征兆：电流表读数为零，电压表读数为 10V。
   原因：(a) R 短路
   (b) R 断路
   (c) 电压源损坏
2. 征兆：电流表读数为零，电压表读数为 0V。
   原因：(a) R 断路
   (b) R 短路
   (c) 电压源关闭或损坏
3. 征兆：电流表读数为 10mA，电压表读数为 0V。
   原因：(a) 电压表有缺陷
   (b) 电流表故障
   (c) 电压源关闭或损坏
4. 征兆：电流表读数为 1mA，电压表读数为 10V。
   原因：(a) 电压表有缺陷
   (b) 电阻值太高
   (c) 电阻值太低
5. 征兆：电流表读数为 100mA，电压表读数为 10V。
   原因：(a) 电压表有缺陷
   (b) 电阻值太高
   (c) 电阻值太低

习题

基本习题

3.1 节

1. 电路中电流为 1A，下列情况电流将如何变化？
   (a) 电压变成原来的 3 倍
   (b) 电压减小 80%
   (c) 电压增大 50%
2. 电路中电流为 100mA，下列情况电流将如何变化？
   (a) 电阻增大 100%
   (b) 电阻增大 30%
   (c) 电阻变成原来的 1/4
3. 电路的电流为 10mA，如果将电压增大至三倍而电阻加倍，则电流如何变化？

3.2 节

4. 确定下列每种情况的电流。
   (a) $V = 5\text{V}$，$R = 1.0\Omega$
   (b) $V = 15\text{V}$，$R = 10\Omega$
   (c) $V = 50\text{V}$，$R = 100\Omega$

(d) $V = 30\text{V}$，$R = 15\text{k}\Omega$

(e) $V = 250\text{V}$，$R = 4.7\text{M}\Omega$

5. 确定下列每种情况的电流。

(a) $V = 9\text{V}$，$R = 2.7\text{k}\Omega$

(b) $V = 5.5\text{V}$，$R = 10\text{k}\Omega$

(c) $V = 40\text{V}$，$R = 68\text{k}\Omega$

(d) $V = 1\text{kV}$，$R = 2\text{k}\Omega$

(e) $V = 66\text{kV}$，$R = 10\text{M}\Omega$

6. 若10Ω电阻接到12V电池上，试问流过电阻的电流为多大？

7. 如图3-29所示将电阻接到直流电压源上，试确定每个电阻的电流。

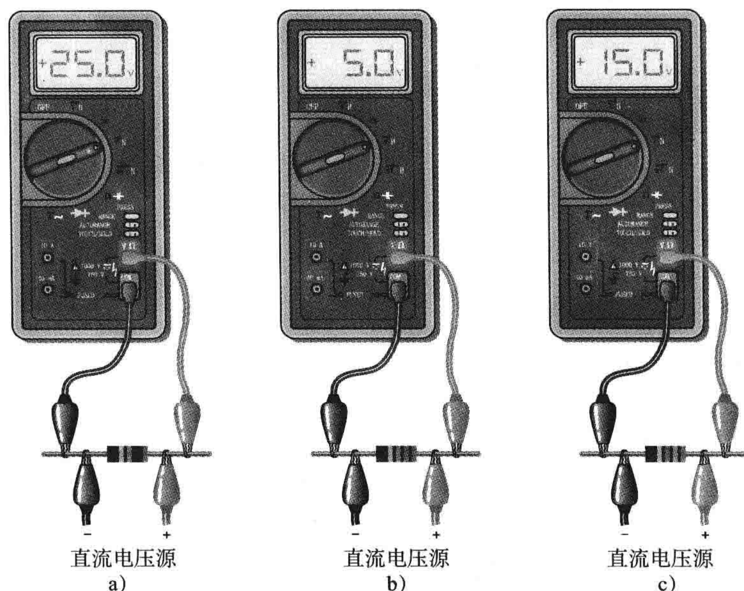


图3-29　习题7图

8. 某五环电阻器接到12V电源上，如果色码是橙、紫、黄、金、棕，试确定电流。

9. 如果将习题8中电压加倍，0.5A的熔丝会烧断吗？为什么？

10. 对应下列 I 和 R 值，计算电压。

(a) $I=2\text{A}$，$R=18\Omega$

(b) $I=5\text{A}$，$R=47\Omega$

(c) $I=2.5\text{A}$，$R=620\Omega$

(d) $I=0.6\text{A}$，$R=47\Omega$

(e) $I=0.1\text{A}$，$R=470\Omega$

11. 对应下列 I 和 R 值，计算电压。

(a) $I=1\text{mA}$，$R=10\Omega$

(b) $I=50\text{mA}$，$R=33\Omega$

(c) $I=3\text{A}$，$R=4.7\text{k}\Omega$

(d) $I=1.6\text{mA}$，$R=2.2\text{k}\Omega$

(e) $I=250\mu\text{A}$，$R=1.0\text{k}\Omega$

(f) $I=500\text{mA}$，$R=1.5\text{M}\Omega$

(g) $I=850\mu\text{A}$，$R=10\text{M}\Omega$

(h) $I=75\mu\text{A}$，$R=47\Omega$

12. 若20mΩ电流感应电阻器的电流为3A，则其两端电压为多少？

13. 在图3-30所示的电路中，标出产生指定电流的电源电压。

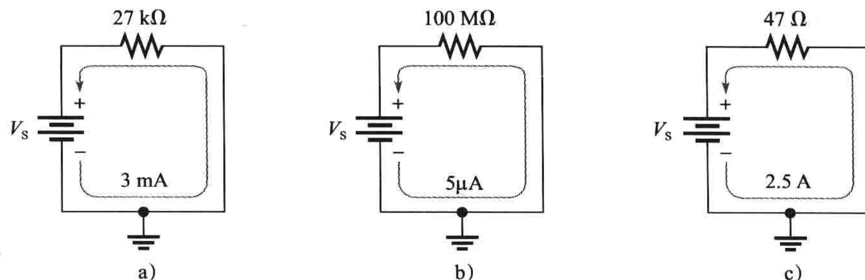


图3-30　习题13图

14. 对应下列 V 和 I 值，计算电阻。
   (a) $V=10\text{V}$，$I=2\text{A}$
   (b) $V=90\text{V}$，$I=45\text{A}$
   (c) $V=50\text{V}$，$I=5\text{A}$
   (d) $V=5.5\text{V}$，$I=10\text{A}$
   (e) $V=150\text{V}$，$I=0.5\text{A}$
15. 对应每组 V 和 I 值，计算 R。
   (a) $V=10\text{kV}$，$I=5\text{A}$
   (b) $V=7\text{V}$，$I=2\text{mA}$
   (c) $V=500\text{V}$，$I=250\text{mA}$
   (d) $V=50\text{V}$，$I=500\mu\text{A}$
   (e) $V=1\text{kV}$，$I=1\text{mA}$
16. 6V 电压加在电阻两端，测得 2mA 电流，则电阻值为多少？
17. 在图 3-31 所示的各个电路中，根据指定的电流值，选择正确的电阻值。

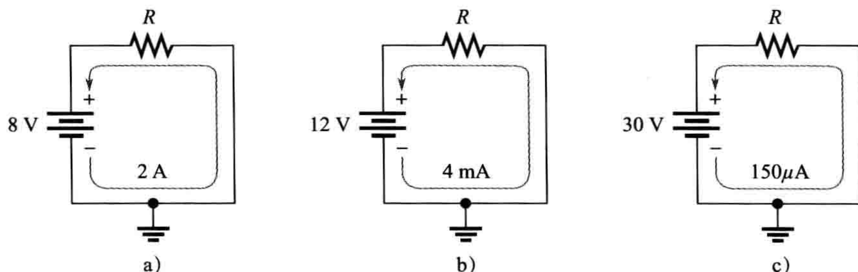


图 3-31　习题 17 图

18. 手电筒的工作电压为 3.2V，热灯丝的电阻为 3.9Ω，试问电池供给的电流为多少？

3.3 节

19. 习题 18 中手电筒 10s 时间用去 26J 能量，试问其功率为多少瓦特？
20. 若以 350J/s 的速率使用能量，则功率为多大？
21. 若 5h 时间使用了 7500J 能量，则功率为多少瓦特？
22. 将下列功率转换成千瓦。
   (a) 1000W　(b) 3750W
   (c) 160W　(d) 50 000W
23. 将下列功率转换成兆瓦。
   (a) 1 000 000W　(b) 3×10^6 W
   (c) 15×10^7 W　(d) 8700kW
24. 将下列功率转换成毫瓦。
   (a) 1W　(b) 0.4W
   (c) 0.002W　(d) 0.0125W
25. 将下列功率转换成微瓦。
   (a) 2W　(b) 0.0005W
   (c) 0.25mW　(d) 0.006 67mW
26. 将下列功率转换成瓦。
   (a) 1.5kW　(b) 0.5MW
   (c) 350mW　(d) 9000μW
27. 试证明功率的单位（瓦特）等价于 1V×1A。
28. 证明一千瓦时有 3.6×10^6 焦耳能量。

3.4 节

29. 如果一电阻器接 5.5V 电压，流过 3mA 电流，请问该电阻消耗的功率是多少？
30. 电热器工作电压为 115V，吸取电流为 3A，试问该电热器使用的功率是多少？
31. 当 500mA 电流通过 4.7kΩ 电阻器时，功率有多大？
32. 0.25mΩ 电流感应电阻器的电流为 5A，则它的功率是多少？
33. 如果 620Ω 电阻器跨接 60V 电压，其消耗的功率是多少？
34. 将 56Ω 电阻器接到 1.5V 电池两端，试问该电阻器消耗的功率是多少？
35. 如果某电阻器承载 2A 电流消耗 100W 功率，试问该电阻值应为多少欧姆？假设电压可以调节到任意需要值。
36. 将 5×10^6 W 使用 1min 的能量转换成 kWh。
37. 将 6700W 使用 1s 的能量转换成 kWh。
38. 试问 50W 使用 12h 相当于多少千瓦时？
39. 假设碱性 D 电池接 10Ω 负载可维持 90h 的平均电压为 1.25V，之后便不能使用。试问在电池的工作寿命期间传递到负载的平均功率是多少？
40. 在习题 39 中，90h 内电池共提供了多少焦耳的能量？

3.5 节

41. 有一个 6.8kΩ 的电阻器烧坏了，需要更换一只同阻值的电阻器，若电阻器承载的电流为 10mA，则该电阻器的额定功率应为多大？假

设各种标准额定功率的电阻器都可选用。

42. 某一类型的电阻器有下列额定功率：3W、5W、8W、12W、20W，而具体应用中要求电阻器的功率大约为 8W，最小安全余量为额定值 20%时应选用哪种额定功率？为什么？

3.6 节

43. 对于图 3-32 所示的每个电路，给电阻器两端电压标注正确的极性。

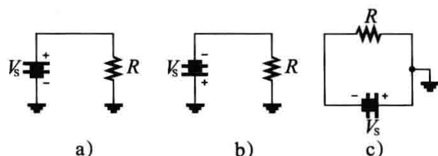


图 3-32 习题 43 图

44. 50Ω 负载消耗的功率为 1W，试问电源的输出电压是多大？

45. 某电池能提供 1.5A 电流 24h，则该电池的额定安时数是多少？

46. 80Ah 电池持续 10h 能提供的平均电流是多少？

47. 如果电池标定为 650mAh，则该电池持续 48h 能提供的平均电流是多大？

48. 如果输入功率为 500mW，输出功率为 400mW，则功率损耗是多少？电源的效率是多少？

49. 如果输入功率为 5W，在 85%效率下工作，则电源的输出功率应为多少？

3.8 节

50. 在图 3-33 所示的电灯电路中，试根据显示的欧姆表读数指出故障灯泡。

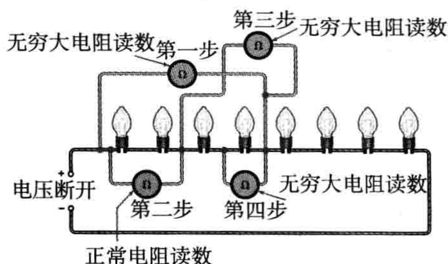


图 3-33 习题 50 图

51. 假设有一个 32 盏灯串，其中一盏灯烧坏，从电路左半边开始使用半分法，如果损坏的灯在左边第 7 个位置，试问需要做多少次测量才能定位故障灯泡？

高级习题

52. 某电源向负载连续提供 2W 功率，电源效率为 60%，试问 24h 内该电源使用了多少千瓦时的能量？

53. 图 3-34a 所示的电路中灯泡的灯丝具有一定的电阻，图 3-34b 用等价电阻表示，如果灯泡的工作电压为 120V，电流为 0.8A，请问灯丝的电阻是多少？

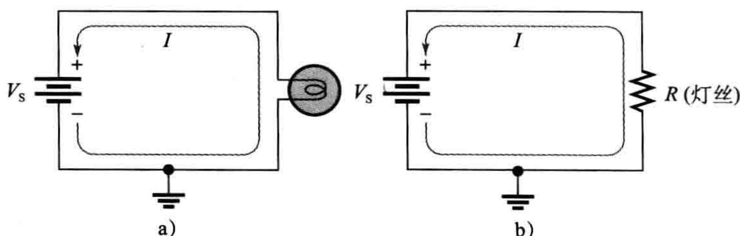


图 3-34 习题 53 图

54. 某电路器件的电阻未知，现在有 12V 电池和一个电流表，请问如何能够确定该器件的电阻？画出电路接线图。

55. 把一可变电压源接到图 3-35 所示的电路中，从 0V 开始以 10V 为步长逐步增大到100V，对每一个电压值确定电路的电流并画出 V-I 图形，该图形是直线吗？这个图说明什么？

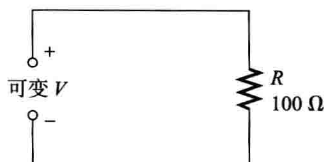


图 3-35 习题 55 图

56. 某电路中 V_S=1V、I=5mA，使用同样的电阻对下列各电压确定电流。

(a) V_S=1.5V (b) V_S=2V
(c) V_S=3V (d) V_S=4V
(e) V_S=10V

57. 图 3-36 是三个电阻的电压电流关系图，试确定 R_1、R_2 和 R_3。

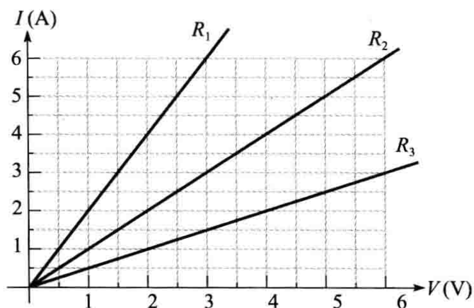


图 3-36 习题 57 图

58. 测量由 10V 电池供电电路的电流，电流表读数为 50mA，后来，发现电流降到 30mA，排除电阻变化的可能性，可确定是电源电压发生了变化，那么，电池电压变化了多少？新的电压值是多少？
59. 如果希望通过改变 20V 电源将电阻的电流从 100mA 增至 150mA，试问电源电压要改变多少伏特？新的值是多少？
60. 将 6V 电源通过两条 12ft 长 18 号铜导线连接到 100Ω 电阻，参照表 2-3 确定下列各量。
    (a) 电流
    (b) 电阻两端的电压
    (c) 每条导线的电压
61. 如果让 300W 灯泡连续点亮 30 天，试问使用了多少千瓦时的电能？
62. 在 31 天周期结束时电费单显示共使用了 1500kWh 电量，试问日平均功率为多少？
63. 某类电阻器的功率额定值有：3W、5W、8W、12W、20W，具体应用中要求电阻器承受的功率约为 10W，请问该选哪种额定功率？为什么？
64. 将 12V 电源接 10Ω 电阻器 2min：
    (a) 功率消耗为多大？
    (b) 使用了多少电能？
    (c) 如果继续保持电阻连接 1min，试问功率消耗增加还是减小？
65. 在图 3-37 中用变阻器控制发热元件的电流，当变阻器调到 8Ω 以下时发热元件损坏。若在最大电流时加热元件两端的电压为 100V，请问需要用多大额定值的熔丝来保护电路？

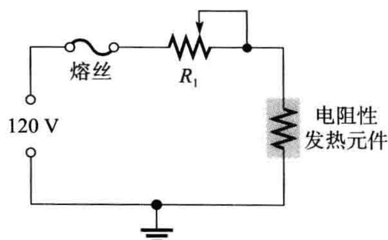


图 3-37 习题 65 图

66. 某 30mΩ 的电流感应电阻器额定功率为 1/2W，试问该电阻不超出额定功率所能承载的最大电流是多少？
67. 如果电流加倍，请问电阻器的功率消耗怎么变化？
68. 给图 3-21 所示负载测试箱开列完整的材料清单。
69. 画出图 3-21 所示负载测试箱的电路原理图。

Multisim 仿真故障排除习题

70. 打开文件 P03-70，确定电路是否正常工作，如果不能，请找出故障。
71. 打开文件 P03-71，确定电路是否正常工作，如果不能，请找出故障。
72. 打开文件 P03-72，确定电路是否正常工作，如果不能，请找出故障。
73. 打开文件 P03-73，确定电路是否正常工作，如果不能，请找出故障。
74. 打开文件 P03-74，确定电路是否正常工作，如果不能，请找出故障。

各节测试题答案

3.1 节

1. 欧姆定律指出电流的变化与电压成正比，与电阻成反比。
2. $I=V/R$
3. $V=IR$
4. $R=V/I$
5. 电流增大；当电压增至三倍时电流也增至三倍。
6. 电阻加倍，电流减半到 5mA。
7. 如果 V 和 R 都加倍，I 不变。

3.2 节

1. I=10V/4.7Ω=2.13A
2. I=20kV/4.7MΩ=4.26mA
3. I=10kV/2kΩ=5A
4. V=1A×10Ω=10V
5. V=3mA×3kΩ=9V
6. V=2A×6Ω=12V
7. R=10V/2A=5Ω
8. R=25V/50mA=0.5kΩ= 500Ω

3.3 节

1. 功率是使用能量的速率。
2. $P=W/t$
3. 瓦特是功率的单位，一瓦特功率为 1s 时间使用

1J 能量。

4. (a) 68 000 W=68kW
   (b) 0.005W=5mW
   (c) 0.000 025W=25μW
5. 100W×10h=1kWh
6. 2000W=2kW
7. 1.322kW×24h=31.73kWh;
   0.11 $/kWh×31.73kWh= $3.49。

3.4 节

1. $P=IV=12A\times 13V=156W$
2. $P=(5A)^2\times 47\Omega=1175W$
3. $V=\sqrt{PR}=\sqrt{2W\times 50\Omega}=10V$
4. $P=\frac{V^2}{R}=\frac{(13.4V)^2}{3.0\Omega}=60W$
5. $P=(8V)^2/2.2k\Omega=29.1mW$
6. $R=55W/(0.5A)^2=220\Omega$

3.5 节

1. 两个电阻器参数是电阻值与额定功率。
2. 电阻器物理尺寸越大，消耗的功率越大。
3. 金属膜电阻器的标准额定功率为 0.125W、0.25W、0.5W 和 1W。
4. 至少需要 0.5W 额定功率才能承受 0.3W 的功率。
5. 5.0V。

3.6 节

1. 电阻中的能量转换是由材料中自由电子与原子碰撞引起的。
2. 电压降是由于能量损失而导致的电阻两端电压的减少。
3. 电流从电压降的负极流向正极。

3.7 节

1. 电流增大表示负载加重。
2. $P_{OUT}=10V\times 0.5A=5W$
3. 100Ah/5A=20h
4. $P_{OUT}=12V\times 5A=60W$
5. 效率=（750mW/1000mW）×100%=75%

3.8 节

1. 分析、规划、测量。
2. 半分法通过逐次分离剩余电路的一半查找故障。
3. 测量电压只要把电压表跨接在元件两端，而测量电流必须把电流表和元件串联。

例题中相关问题答案

例 3-1　$I_1=10V/5\Omega=2A$；$I_2=10V/20\Omega=0.5A$
例 3-2　1V
例 3-3　970mΩ
例 3-4　是
例 3-5　11.1mA
例 3-6　5mA
例 3-7　25μA
例 3-8　200μA
例 3-9　800V
例 3-10　220mV
例 3-11　16.5V
例 3-12　电压降至 1.08V
例 3-13　6.0Ω
例 3-14　39.5kΩ
例 3-15　3000J
例 3-16　2kWh
例 3-17　$4.92+$0.07=$4.99
例 3-18　(a) 40W　(b) 376W　(c) 625mW
例 3-19　26W
例 3-20　否
例 3-21　77W
例 3-22　46W
例 3-23　60Ah

是非测验题答案

1.T　2.F　3.T　4.F　5.F　6.T　7.F　8.T　9.F　10.T

自测题答案

1. (b)　2. (c)　3. (b)　4. (d)　5. (a)　6. (d)　7. (b)　8. (c)　9. (d)　10. (a)
11. (a)　12. (d)　13. (c)　14. (a)　15. (c)

故障排除：征兆与原因的答案

1. (b)　2. (c)　3. (a)　4. (b)　5. (c)

第4章

串联电路

本章目标

- 识别串联电阻性电路
- 确定串联总电阻
- 确定流过串联支路的电流
- 在串联电路中应用欧姆定律
- 确定电压源串联连接的总效应
- 应用基尔霍夫电压定律
- 利用串联电路作分压器
- 确定串联电路的功率
- 说明如何测量对地电压
- 串联电路故障排除

电阻电路有两种基本形式：串联或并联。本章讨论串联电路，并联电路放在第5章介绍，而串联与并联的组合放在第6章讨论。本章介绍欧姆定律在串联电路中的应用，和另一个重要定律——基尔霍夫电压定律，此外，还将介绍一些串联电路的重要系统应用。

4.1 电阻器串联

串联时，电阻器形成一“串”，其中只有一条电流路径。

学习完本节内容，应该能够

- 识别串联电阻电路；
- 将串联电阻器的物理布局转换成电路原理图。

图4-1a显示了A点和B点之间两个电阻器串联，图4-1b显示了3个电阻器的串联，图4-1c则显示4个电阻器的串联。当然，任意个电阻器都可以串联起来。

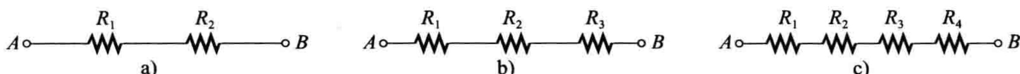


图4-1　电阻器串联

对于图4-1的连接，当电压源从A点和B点之间接入时，从一点到另一点电流流动的唯一路径就是通过每个电阻器。串联电路的识别方法如下：**串联电路在两点之间仅有一条电流路径，因此，串联电路中每个电阻器都流过相同的电流。**

在实际电路图中，串联电路并非如图4-1那样容易识别。例如，图4-2以另一种方式画出了带有所加电压的串联电阻器。记住，不管电路图如何画，如果两点之间只有一条电流路径，则这两点之间的电阻器就是串联连接。

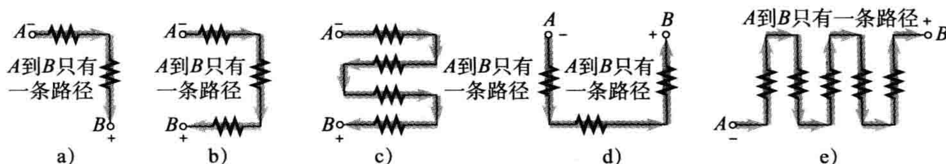


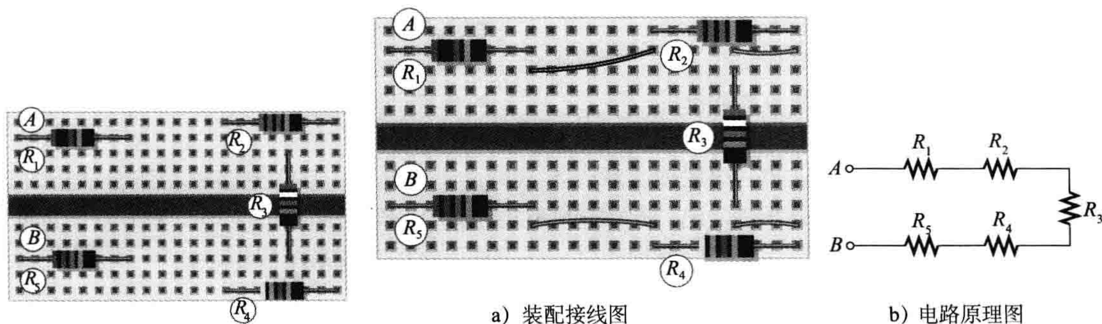
图4-2　电阻串联举例（注：由于只有一条路径所以各点电流都相同。）

【例4-1】　如图4-3所示，5个电阻器置于面包板上。按下面要求把它们串联起来：从负

极端（一）出来首先到 R_1，第二个到 R_2，第三个到 R_3，如此下去。绘制对应连线的电路原理图。

其中，电阻 R_1 的色环颜色分别为：棕、黑、红、金；电阻 R_2 的色环颜色分别为：橙、橙、橙、金；电阻 R_3 的色环颜色分别为：橙、白、橙、金；电阻 R_4 的色环颜色分别为：红、红、橙、金；电阻 R_5 的色环颜色分别为：黄、紫、棕、金。

解： 接线图如图 4-4a 所示，这是个组装图，电路原理图如图 4-4b 所示。注意，电路原理图不必按照组装图中电阻器实际的物理排列来画出，电路原理图只是给出电阻器的电气连接，而组装图则给出了元件的排列和物理互连。



a）装配接线图

b）电路原理图

图 4-3 例 4-1 图

图 4-4 例 4-1 的接线图

相关问题：(a) 说明怎样对图 4-2a 重新接线使奇数编号电阻器先从 A 点接出来，然后再接偶数编号的电阻器。(b) 确定每个电阻器的值。

【例 4-2】 说明图 4-5 中印制电路板上电阻器的电气关系，确定每个电阻器的电阻值。其中，电阻 R_1 的色环颜色分别为：红、红、红、金；电阻 R_2 的色环颜色分别为：橙、橙、红、金；电阻 R_3 的色环颜色分别为；棕、黑、红、金；电阻 R_4 的色环颜色分别为：棕、红、红、金；电阻 R_5 的色环颜色分别为：橙、橙、红、金；电阻 R_6 的色环颜色分别为：黄、紫、红、金；电阻 R_7 的色环颜色分别为：绿、蓝、红、金；电阻 R_8 的色环颜色分别为：棕、红、橙、金；电阻 R_9 的色环颜色分别为：蓝、灰、橙、银；电阻 R_{10} 的色环颜色分别为：红、紫、橙、金；电阻 R_{11} 的色环颜色分别为：棕、红，橙、银；电阻 R_{12} 的色环颜色分别为：灰、红、橙、黄；电阻 R_{13} 的色环颜色分别为：红、紫、黄、银。

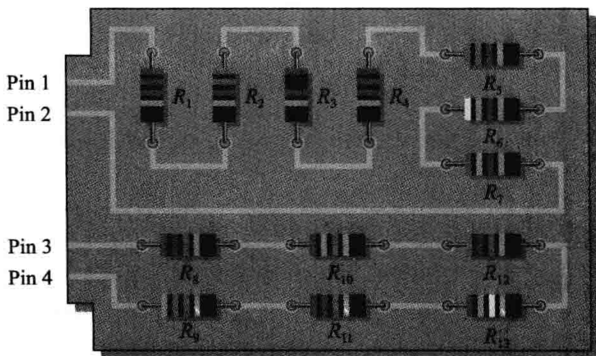


图 4-5 例 4-2 图

解： 电阻器 R_1 到 R_7 相互串联，这组串联接在印制电路板的引脚 1 和引脚 2 之间。

电阻器 R_8 到 R_{13} 相互串联，这组串联接在印制电路板的引脚 3 和引脚 4 之间。

电阻器的阻值为 $R_1=2.2\text{k}\Omega$、$R_2=3.3\text{k}\Omega$、$R_3=1.0\text{k}\Omega$、$R_4=1.2\text{k}\Omega$、$R_5=3.3\text{k}\Omega$、$R_6=4.7\text{k}\Omega$、$R_7=5.6\text{k}\Omega$、$R_8=12\text{k}\Omega$、$R_9=68\text{k}\Omega$、$R_{10}=27\text{k}\Omega$、$R_{11}=12\text{k}\Omega$、$R_{12}=82\text{k}\Omega$、$R_{13}=270\text{k}\Omega$。

相关问题：当引脚 2 和引脚 3 连接起来时，图 4-5 中的电路会如何变化？

本节测试题

1. 串联电路中电阻器如何连接？
2. 怎样辨别串联电路？
3. 对图 4-6 中的每个电路，把电阻器依照数字编号从 A 点串联到 B 点，画出完整电路图。
4. 把图 4-6 中每一组串联电阻器再彼此串联起来。

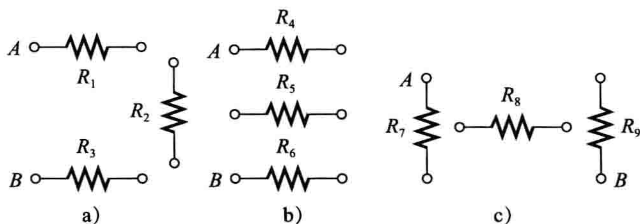


图　4-6

4.2　串联总电阻

串联电路的总电阻等于串联电路各个电阻器的电阻值之和。

学习完本节内容，应该能够

- 确定串联总电阻；
- 解释为什么电阻器串联连接时电阻值相加；
- 应用串联电阻公式。

4.2.1　串联电阻值相加

当电阻器串联连接时，由于各个电阻器均贡献了与其电阻值成正比的对电流的阻碍，所以电阻值相加。串联的电阻器越多，对电流的阻碍就越大，对电流的阻碍越大意味着更高的电阻值，因此，每添加一个电阻器串联，总电阻都增大。

图 4-7a 显示了串联电阻加起来如何增大总电阻。图 4-7a 只有单个 10Ω 电阻器，图 4-7b 表示另一个 10Ω 电阻器与原电阻器串联，形成 20Ω 的总电阻，如果第三个 10Ω 电阻器再与前两个电阻器串联，如图 4-7c 所示，则电阻为 30Ω。

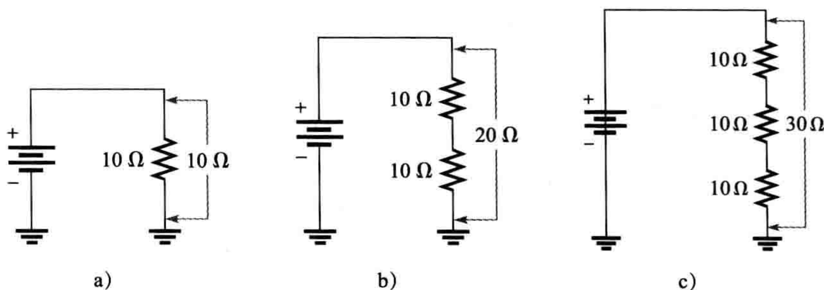


图 4-7　每增加一个电阻器串联总电阻增大，这里所用接地符号已在 2.6 节介绍过

4.2.2　串联电阻公式

对于任意个电阻器串联，总电阻为各个串联电阻值之和。

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n \tag{4-1}$$

式中，R_T为总电阻，R_n为最后一个串联电阻（n 可以是任意正整数，表示串联电阻器的数量）。例如，如果有四个电阻串联（$n=4$），总电阻公式为

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

如果有六个电阻串联（$n=6$），总电阻公式为

$$R_T=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_6$$

为了说明总电阻的计算，我们来确定图4-8所示电路的R_T，此处V_S是电源电压。这个电路具有5个串联电阻，为求总电阻，可简单地把电阻值相加

$$R_T=56\Omega+100\Omega+27\Omega+10\Omega+47\Omega=240\Omega$$

注意，在图4-8中电阻相加的次序是无关紧要的。同样，在电路中也可以改变电阻器的物理连接顺序而不影响电路的总电阻。

【例4-3】 试将图4-9所示面包板上的电阻器串联起来，并根据色码确定总电阻R_T。其中，电阻R_1的色环颜色分别为：橙、橙、黑、银；电阻R_2的色环颜色分别为：蓝、灰、黑、银；电阻R_3的色环颜色分别为：棕、黑、棕、银；电阻R_4的色环颜色分别为：黄、紫、黑、银；电阻R_5的色环颜色分别为：棕、黑、黑、金。

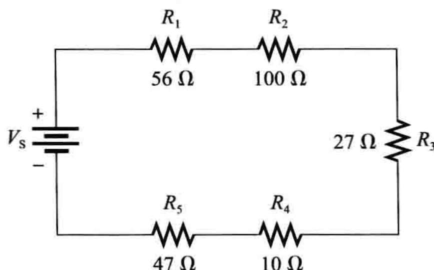


图4-8　5个电阻串联的例子，V_S代表电源电压

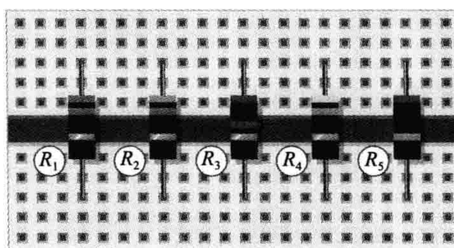
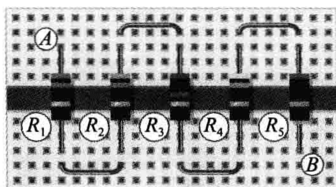


图4-9　例4-3图

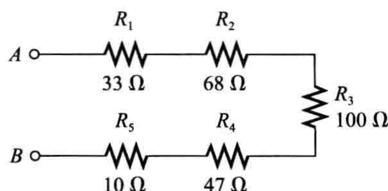
解： 电阻器串联如图4-10所示，把各电阻值相加可得总电阻。

$$R_T=R_1+R_2+R_3+R_4+R_5=33\Omega+68\Omega+100\Omega+47\Omega+10\Omega=258\Omega$$

相关问题：如果在图4-10a中交换R_2和R_4的位置，试确定总电阻。



a）电路组装图



b）电路原理图

图4-10　例4-3中电阻器的串联

【例4-4】 计算图4-11中每个电路的总电阻R_T。

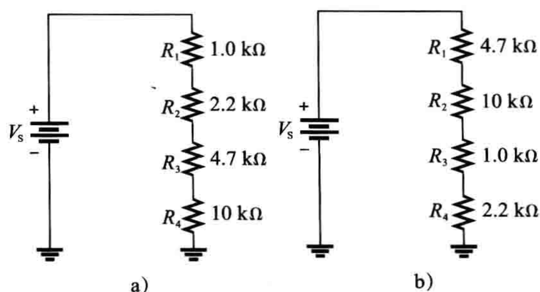


图　4-11

解：对于图 4-11a，R_T＝1.0kΩ＋2.2kΩ＋4.7kΩ＋10kΩ＝17.9kΩ

对于图 4-11b，R_T＝4.7kΩ＋10kΩ＋1.0kΩ＋2.2kΩ＝17.9kΩ，

注意，总电阻与电阻器的位置无关，两个电路串联总电阻值相同。

相关问题：试问电阻器 1.0kΩ、2.2 kΩ、3.3 kΩ、5.6 kΩ 串联起来电阻为多大?

【例 4-5】　确定图 4-12 所示电路中 R_4 的值。

解：从欧姆表读数可知，　　　　　R_T＝146KΩ

解 R_4 得

$$R_4=R_T-(R_1+R_2+R_3)=146\text{k}\Omega-(10\text{k}\Omega+33\text{k}\Omega+47\text{k}\Omega)=56\text{k}\Omega$$

相关问题：如果欧姆表读数为 112 kΩ，试确定图 4-12 中 R_4 的电阻值。

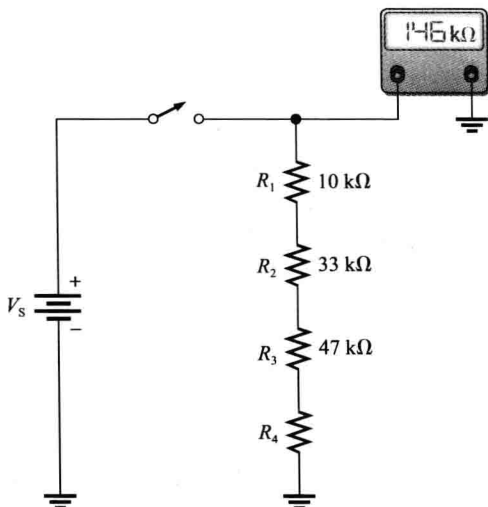


图　4-12

4.2.3　等阻值电阻器串联

当多个电阻值相同的电阻器串联时，有一个简便的计算总电阻的方法：简单地用单个电阻器的电阻值乘以串联电阻器的个数。用这个方法计算的电阻与把每个电阻值相加结果相同。例如，5 个 100Ω 电阻器串联总电阻为 R_T＝5×100Ω＝500Ω。一般地，用下列公式表示

$$R_T=nR \tag{4-2}$$

式中，n 是等值电阻器的数量，R 是电阻器的电阻值。

【例 4-6】　求 8 个 22Ω 电阻器串联的 R_T。

解：电阻值相加求 R_T。

$$R_T=22\Omega+22\Omega+22\Omega+22\Omega+22\Omega+22\Omega+22\Omega+22\Omega=176\Omega$$

然而，用乘法就简单多了。

$$R_T=8\times22\Omega=176\Omega$$

相关问题：求 3 个 1.0kΩ 电阻器和两个 680Ω 串联的 R_T。

系统举例 4-1　电动机起动器

直流并励电动机（将在 7.7 节讨论）是一种电动机类型，它可以在很宽范围内保持高效率的转矩-转速特性。对于可变负载，如电动葫芦电动机，直流并励电动机具有可同时控制速度和转矩的优点，由电压控制速度，由电流控制转矩。

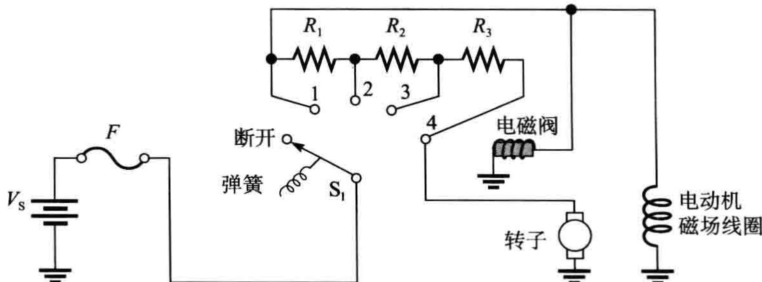


图 4-13　用于直流并励电动机的手动电动机起动器

并励电动机有两个相互作用的电磁铁：一个称为磁场线圈；另一个称为转子，它是一个旋转的电磁铁。如果没有限流装置以全电压施加给电动机，初始电流会非常高，这有烧坏电动机的危险，或者会因线路超载而烧断保险丝或断路器跳闸。为了避免这种情况，直流并励

电动机在起动时用电阻器（或其他装置）来限制电流，直到电动机速度升上去。之后，电阻撤出，根据负载要求调整速度和转矩。

电动机起动电路提供了限制电流的方法，如图4-13所示。根据需要顺时针旋转开关逐步将电阻器去除使得电阻越来越小。本例中显示的是手动旋转开关，但同样可以采用自动方法。为了起动电动机，把开关从off旋到1，这时将直流电压加在磁场线圈和串联电磁阀（电磁铁，用于保持开关到位）上，如果因任何原因使功率下降，电磁铁将释放开关，由弹簧将开关拉回到断开的位置，防止电动机在没有电阻时重新起动。

本节测试题

1. 计算图4-14中各个电路A点与B点之间的R_T。其中，图4-14a中电阻R_1的色环颜色分别为：橙、橙、黑、金；电阻R_2的色环颜色分别为：棕、黑、棕、金；电阻R_3的色环颜色分别为棕、黑、黑、金。图4-14b中电阻R_1的色环颜色分别为：橙、白、黑、金；电阻R_2的色环颜色分别为：绿、蓝、黑、银；电阻R_3的色环颜色分别为：棕、黑、黑、金。图4-14c中电阻R_1的色环颜色分别为：红、红、红、银；电阻R_2的色环颜色分别为：灰、红、棕、银；电阻R_3的色环颜色分别为：棕、黑、红、银。

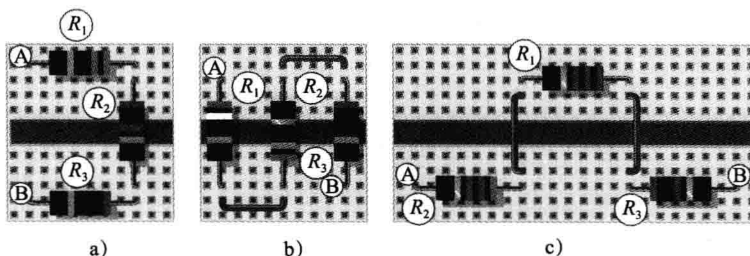


图 4-14

2. 下列电阻器串联：一个100Ω、两个47Ω、4个12Ω、一个330Ω，试问总电阻为多少？
3. 假设有下列阻值的电阻器各一个：1.0kΩ、2.7kΩ、3.3kΩ和1.8kΩ，要得到10kΩ总电阻，还需要一个电阻器，试问其电阻值应该是多少？
4. 试问12个47Ω电阻器串联的R_T是多少？

4.3 串联电路中的电流

在串联电路中流过所有点的电流是相同的，通过串联电路中每个电阻器的电流也是相同的。

学习完本节内容，应该能够

- 确定流过串联电路的电流；
- 证明串联电路中各点的电流相同。

图4-15显示了3个电阻器串联接到电压源上，在这个电路的任意一点，流进该点的电流必须等于流出这个点的电流，如电流方向箭头所示。注意，从每个电阻器流出的电流也必须等于流进该电阻器的电流。因为电流没有地方分叉

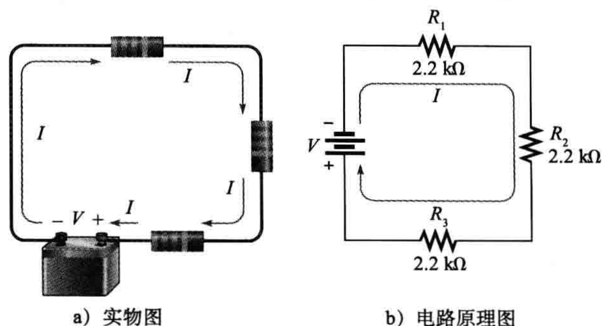
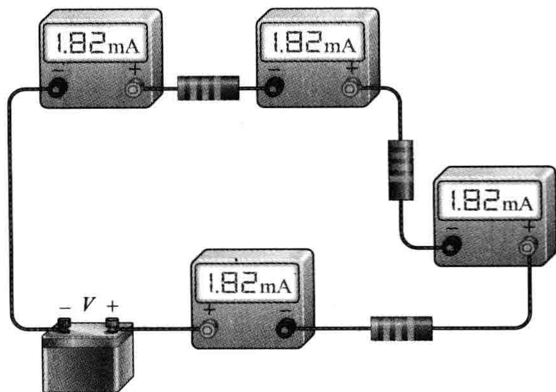


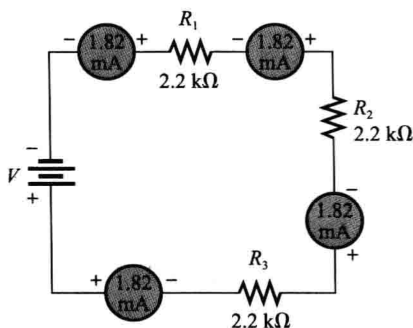
图4-15 流进串联电路任一点的电流等于流出该点的电流

流向别处，所以，各个部分的电流都是相同的，从电源的负极（—）侧到正极（+）侧只有一条路径。

在图 4-16 中，电池提供 1.82mA 电流给串联电路，从电池的负极端流出 1.82mA 电流，如图所示，在串联电路的几个点测得的电流都是相同的。



a）实物图



b）电路原理图

图 4-16　串联电路所有点的电流相同

本节测试题

1. 对于串联电路中任意点的电流量你能给出什么说法？
2. 在一个 100Ω 电阻器与 47Ω 电阻器串联的电路中，流过 100Ω 电阻的电流为 20mA，请问流过 47Ω 电阻器的电流是多少？
3. 毫安表接在图 4-17 的 A 点与 B 点之间，测得为 50mA，如果将电表改接在 C 点与 D 点之间，试问电表将指示多大电流？如果改接在 E 点与 F 点之间呢？
4. 在图 4-18 中，试问电流表 1 指示多大电流？电流表 2 呢？

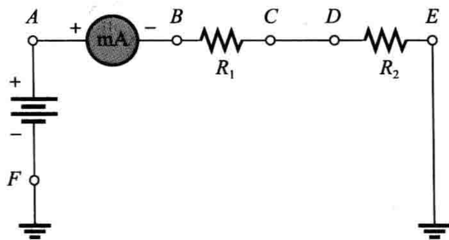


图 4-17　测试题 3 图

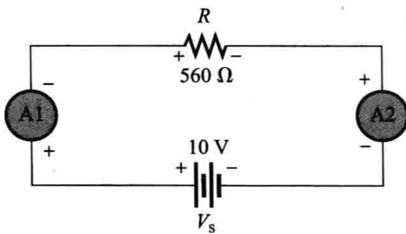


图 4-18　测试题 4 图

4.4　欧姆定律的应用

串联电路的基本概念和欧姆定律可以用于串联电路的分析。

学习完本节内容，应该能够

- 将欧姆定律用于串联电路；
- 求串联电路的电流；
- 求串联电路中每个电阻器两端的电压。

下面是分析串联电路时要记住的关键点。

1. 流过任一串联电阻器的电流与总电流相同。

2. 如果已知所加的总电压和总电阻，可由欧姆定律确定总电流。

$$I_T=\frac{V_T}{R_T}$$

3. 如果已知某个串联电阻 R_x 两端的电压，可由欧姆定律确定总电流。

$$I_T=\frac{V_x}{R_x}$$

4. 如果已知总电流，可由欧姆定律确定任一串联电阻器两端的电压降。

$$V_x=I_TR_x$$

5. 电阻器两端电压降的极性是靠近电压源正极端的一端为正极。

6. 流过电阻器电流的方向定义为从电阻器的负极端流向正极端。

7. 串联电路中的开路阻止了电流，因此，串联电阻器两端电压都为零，总电压全部呈现在开路点两侧。

现在我们看几个用欧姆定律分析串联电路的例子。

【例 4-7】　求图 4-19 所示电路的电流。

解：电流由电源电压和总电阻确定，首先计算总电阻。

$$R_T+R_1+R_2+R_3+R_4=820\Omega+180\Omega+150\Omega+100\Omega=1.25\text{k}\Omega$$

然后用欧姆定律计算电流。

$$I=\frac{V_S}{R_T}=\frac{25\text{V}}{1.25\text{k}\Omega}=20\text{mA}$$

记住，电路中各点电流相同。因此，流过每个电阻的电流都是 20mA。

相关问题：如果 R_4 变为 200Ω，试问图 4-19 中的电流是多少？

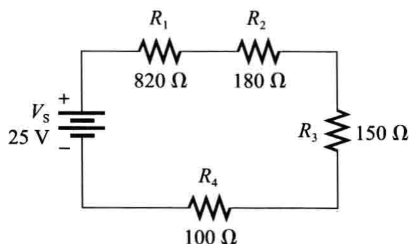


图 4-19　例 4-7 图

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E04-07，连接万用表验证本例计算的电流值。将 R_4 改为 200Ω 验证相关问题中计算的电流值。

【例 4-8】　图 4-20 电路中的电流为 1mA，对于这个电流量，电源电压 V_S 应该是多少？

解：为了计算 V_S，首先确定 R_T。

$$R_T=1.2\text{k}\Omega+5.6\text{k}\Omega+1.2\text{k}\Omega+1.5\text{k}\Omega=9.5\text{k}\Omega$$

现在用欧姆定律确定 V_S。

$$V_S=IR_T=1\text{mA}\times 9.5\text{k}\Omega=9.5\text{V}$$

相关问题：如果 5.6kΩ 电阻变成 3.9kΩ，试问保持 1mA 电流所需的 V_S 值是什么？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E04-08，验证建立图 4-20 的电流所计算的电源电压，验证相关问题中确定的 V_S 值。

【例 4-9】　计算图 4-21 中各个电阻器两端的电压降并求 V_S 值。如果电流限制到 5mA，试问 V_S 能升高到什么值？

解：根据欧姆定律，每个电阻器两端的电压降等于其电阻值乘以流过它的电流。用欧姆定律公式 $V=IR$ 确定每个电阻器两端的电压降。记住每个串联电阻器流过同样的电流，R_1 两端的电压降（记为 V_1）为

$$V_1=IR_1=1\text{mA}\times 1.0\text{k}\Omega=1\text{V}$$

图 4-20 例 4-8 图

图 4-21 例 4-9 图

R_2两端的电压降为

$$V_2 = IR_2 = 1\text{mA} \times 3.3\text{k}\Omega = 3.3\text{V}$$

R_3两端的电压降为

$$V_3 = IR_3 = 1\text{mA} \times 4.7\text{k}\Omega = 4.7\text{V}$$

为了计算V_S值，首先确定总电阻

$$R_T = 1.0\text{k}\Omega + 3.3\text{k}\Omega + 4.7\text{k}\Omega = 9\text{k}\Omega$$

电源电压V_S等于电流乘以总电阻

$$V_S = IR_T = 1\text{mA} \times 9\text{k}\Omega = 9\text{V}$$

注意，如果把所有电阻器电压降加起来，也能得到相同的9V结果。

I=5mA时V_S增至最大值，因此，V_S的最大值为

$$V_{S(max)} = IR_T = 5\text{mA} \times 9\text{k}\Omega = 45\text{V}$$

相关问题：如果R_3=2.2kΩ且I保持为1mA，重新计算V_1、V_2、V_3、V_S和$V_{S(max)}$。

Multisim 仿真

打开Multisim仿真文件E04-09，用万用表验证电阻两端的电压与本例的计算值相等。

系统注释 指示灯

指示灯是用于判断机器或继电器特定状态的一种通用方法，如电动机起动器。常用电压的白炽指示灯可用于工业厂房内（120V，240V，480V和600V）。在小型系统中，通常电压较低，LED是用做指示状态（例如电源接通）的较好选择。典型的指示用LED压降约为2V，导通电流为20mA。为了防止电流超出规格，需要给LED串联限流电阻。例4-10显示了当需要根据环境条件变化亮度时如何计算限流电阻的大小。

(yukosourovl/Fotolia. com)

【例4-10】 LED常用于系统中对特定状态的指示，LED指示灯有指定的电流要求，电流太小LED太昏暗，而电流过大则会烧坏。在某些系统中，需要根据环境条件控制亮度。图4-22显示了这种基本应用，其中LED用做系统指示灯。该电路中变阻器和串联固定电阻器限制LED的电流，加入变阻器是为了可以根据环境条件调暗LED，我们主要讨论这两个限流电阻。

图 4-22

LED导通时在正常工作范围内两端的压降约为1.7V左右，电源的剩余电压将加在两个串联电阻上，变阻器和电阻器合起来有3.3V电压。

假定希望LED的电流范围从最小的2.5mA（暗）到最大的10mA（亮），试问，该如何选

择 R_1 和 R_2 实现这个要求？

解： 从最亮的条件开始，这时变阻器的电阻应调整到 0Ω。这种情况下，R_1 两端无电压，而 R_2 两端电压为 3.3V。因为是串联电路，R_2 的电流与 LED 相同。因此，由欧姆定律，

$$R_2=\frac{V}{I}=\frac{3.3\text{V}}{10\text{mA}}=330\Omega$$

现在再确定电流限制在 2.5mA 时的总电阻。总电阻 $R_T=R_1+R_2$，而且 R_T 两端的电压是 3.3V，由欧姆定律，

$$R_T=\frac{V}{I}=\frac{3.3\text{V}}{2.5\text{mA}}=1.32\text{k}\Omega$$

为了求 R_1，从总电阻中减去 R_2 的值，

$$R_1=R_T-R_2=1.32\text{k}\Omega-330\Omega=990\Omega$$

选择 1.0kΩ 标准值的变阻器。

相关问题：如果最亮的电流是 12mA，试问 R_2 的值为多少？

本节测试题

1. 6V 电池接了 3 个串联的 100 Ω 电阻器，试问流过每个电阻的电流为多少？
2. 若要在图 4-23 所示的电路中产生 5mA 电流，试问需要的电压是多少？

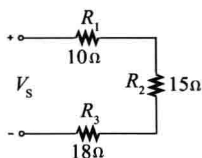


图 4-23

3. 当电流为 5mA 时，试问图 4-23 中每个电阻两端降了多少电压？
4. 4 个等值电阻器串联接到 5V 电源上，测得电流为 4.63mA，试问每个电阻器的阻值是多少？
5. 假设 LED 压降为 1.7V，要将 LED 从 3V 电源获得的电流限制在 10mA，试问应串联限流电阻的阻值是多少？

4.5 电压源串联

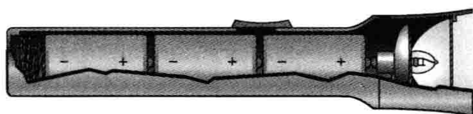
回想一下，电压源就是一个给负载提供恒定电压的能量源，电池和电源是直流电压源的实例。两个或多个电压源串联连接时，总电压等于各个电源电压的代数和。

学习完本节内容，应当能够

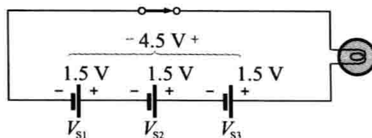
- 确定串联电压源的总效应；
- 确定同极性串联电源的总电压；
- 确定反极性串联电源的总电压。

当电池置于手电筒内时，它们顺向串联排列以产生较高的电压，如图 4-24 所示。在这个例子中，3 个 1.5V 电池串联放置产生总电压 ($V_{S(总)}$)。

$$V_{S(总)}=V_{S1}+V_{S2}+V_{S3}=1.5\text{V}+1.5\text{V}+1.5\text{V}=4.5\text{V}$$



a) 用串联电池的手电筒



b) 手电筒的电路原理图

图 4-24 顺向串联电压源举例

小贴士 更换手电筒或其他设备的电池时，最好都使用相同类型的电池，且不能将旧电池与新电池混用，尤其不要混用碱性与非碱性电池。电池的不正确使用可能会导致电池内部产生氢气并造成外壳破裂。更糟糕的是，氢气与氧气混合具有爆炸危险，已有手电筒出现爆炸危险情况的报道。

当串联电压源（本例中是电池）的极性方向一致或顺向串联时互相叠加，而当串联电压源的极性方向相反或反向串联时互相抵消。例如，如果在手电筒中有一节电池转换方向，如图4-25所示，由于其电压是负的，因此要减去，总电压减小。

$$V_{S(总)}=V_{S1}-V_{S2}+V_{S3}=1.5V-1.5V+1.5V=1.5V$$

实际上没有理由要将电池翻转过来，如果真的意外地翻转了电池的极性，则可能导致电流过大并降低电池的寿命。然而，在电机中确实存在反向的电源，在电机内会产生与电源电压反向的电压以降低电流，这将在7.7节介绍。

【例4-11】 试问在图4-26中总电源电压（$V_{S(总)}$）是多大？

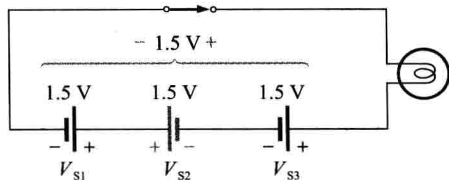


图4-25 当电池反向连接时总电压是各电压的代数和，如前所述，这不是正确的电池安放方式

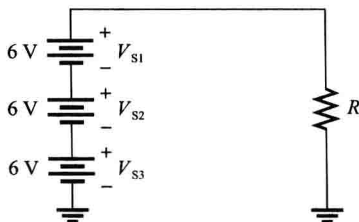


图4-26 例4-11图

解： 各个电源的极性相同（电源在电路中按同方向连接），因此，三个电压相加得到总电压。

$$V_{S(总)}=V_{S1}+V_{S2}+V_{S3}=6V+6V+6V=18V$$

三个分开的电源可以用一个等效的18V电源替代，极性如图4-27所示。

相关问题：在图4-26中，如果电池V_{S3}不小心装反了，试问总电压为多少？

Multisim仿真

打开Multisim仿真文件E04-11，验证总电源电压，对相关问题重复作验证。

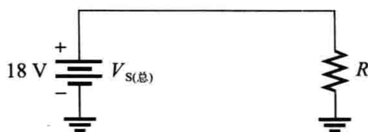


图4-27 电源的极性

系统举例4-2 串联太阳电池板

太阳电池板（模块）由若干太阳电池阵列连接组成，在阳光充足时产生一定的电压。在充足的阳光下，模块内每个太阳电池产生的电压只有约0.5V，因此，18V电池板至少需要36个太阳电池串联，而24V电池板则至少需要48个太阳电池串联。对于大多数为电池充电的场合这个电压是足够的。一般情况下，标准测试条件（STC）标定的模块电压范围为16.5～72.3V，以便模块之间的比较，而实际工作情况是不同的。

图4-28是一个独立于公共电网（本例）的太阳能发电系统的方框图。没有太阳能输入时它有一组电池蓄电，太阳能模块将阳光转换为直流电能送往充电控制器，充电控制器调节充电电流，防止对电池过度充电或需要电池向负载供电时通过太阳电池模块消耗电池的电力，逆变器将直流输出转换为交流给小家电供电。这个系统中使用基本的逆变器而不是更昂贵的并网逆变器，并网逆变器是一种任何连接到公用电网的可再生能源系统都必需的特殊逆变器。

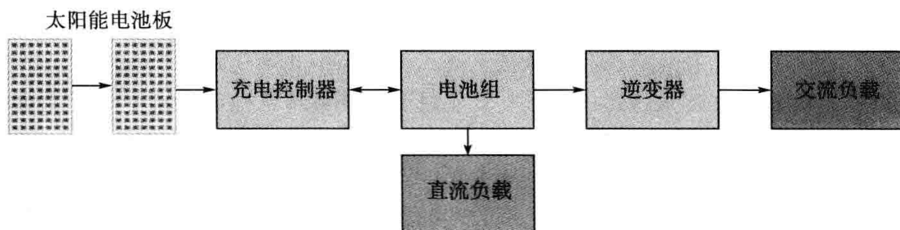


图 4-28 典型的小型太阳能发电系统

对于大多数系统，大量的模块连接在一起以提供更高的直流电压以转换为交流。模块的额定电压和逆变器的额定电压确定了可以串联多少模块，系统中的所有组件（包括模块、接线和逆变器等）必须针对最大系统电压作额定。在美国，大多数安装的最大允许电压为 600 V。

本例中，单个太阳能模块的最大电压为 34.6V，额定功率为 250W，可串联安装的模块数量取决于最大允许电压。对于 600V 允许电压，不超过 600V 的最大串联连接模块数是 17，这里最大电压为 588V。模块串联起来的优点是高电压的效率更高，而且由于流过每个模块的电流相同可以使用较小的导线。该阵列的最大额定功率是 17 模块×250W/模块＝4250W。

【例 4-12】 许多电路使用正负电源电压，双电源通常具有两路独立输出，如图 4-29 所示。请说明如何从电源接出两个 12V 输出，一个正一个负，并且两个电源顺向串联。

解： 见图 4-30，一个电源的正输出接到另一个电源的负输出，这样的连接为顺向串联，接地端连到两个电源的公共端，这就迫使 A 输出低于地（意味着对地是负电压），而 B 输出高于地（对地正电压）。

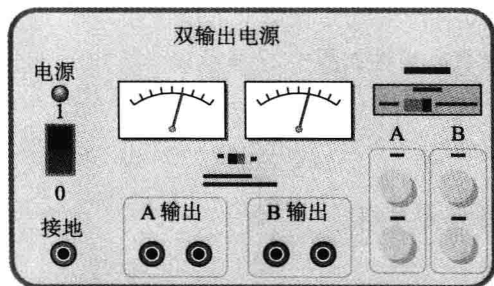


图 4-29 例 4-12 图

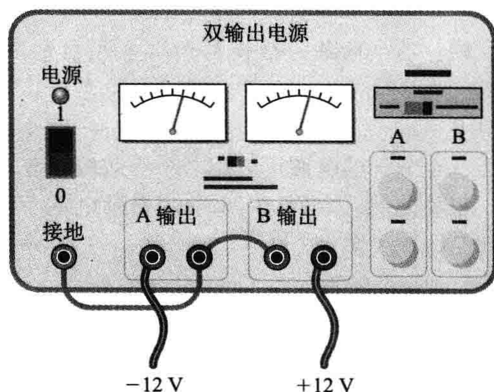


图 4-30 连接电路

相关问题：画出图 4-30 设置的电路原理图。

本节测试题

1. 为了产生 60V 电压需要串联多少个 12V 电池？画出电池连接的电路原理图。
2. 4 个 1.5V 手电筒电池顺向串联连接，试问灯泡两端的总电压是多少？
3. 图 4-31 中所示的电阻电路用于晶体管放大器的偏置，说明如何把电阻接到两个 15V 电源以使串联电阻两端得到 30V 电压？

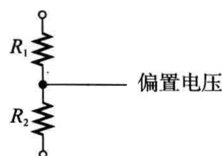


图 4-31 测试题 3 图

4. 试确定图4-32所示电路的总电源电压。

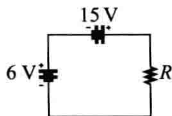


图4-32 测试题4图

5. 假设在4节电池的手电筒中4个1.5V电池里有一个不小心装反了方向。这种情况下，当手电筒开时灯泡两端的电压是多少？

4.6 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律是一个基本电路定律，指出围绕一个闭合路径的所有电压代数和为零。换句话说，所有电压降之和等于总电源电压。

学习完本节内容，应该能够

- 应用基尔霍夫电压定律；
- 表述基尔霍夫电压定律；
- 通过叠加电压降确定电源电压；
- 确定未知电压降。

在电路中，电阻器两端的电压（电压降）总是具有和电源电压相反的极性。例如，在图4-33中沿着顺时针环路绕行电路，注意到电源极性是从正到负，而每个电压降都是从负到正。

图4-33中电流从电源的负端流出按箭头方向通过电阻器，电流从每个电阻器的负端流入正端流出。第3章已经介绍过，电子流过电阻器时将失去能量，因此从电阻器出来时处于较低的能级，低能量一侧比高能量一侧负得少些（正得多些），电阻器两端能级的降低产生电位差或称电压降，沿电流方向为负到正的极性。

从图4-33电路的A点到B点的电压为电源电压V_S，同样，从A点到B点的电压也是电阻器电压降之和。因此，正如**基尔霍夫电压定律**所指出的那样，电源电压等于3个电压降之和。

绕电路中单个闭合路径的所有电压降之和等于在该闭合路径中的总电源电压。

基尔霍夫电压定律应用于串联电路，如图4-34所示。这里，可用下式表示

$$V_S=V_1+V_2+V_3+\cdots+V_n \tag{4-3}$$

式中，下标n表示电压降的数目。

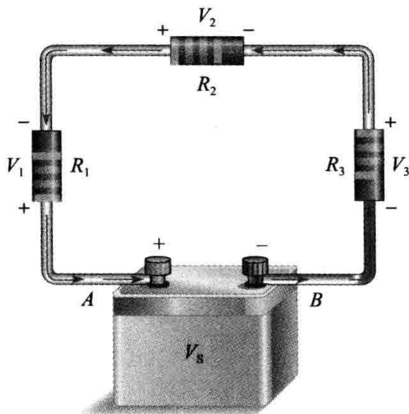


图4-33 闭环电路中电压极性演示

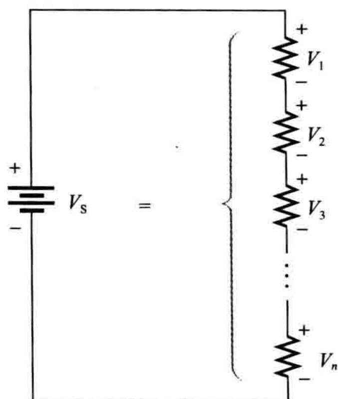


图4-34 n个电压降之和等于电源电压

如果把沿闭合路径的所有电压降相加，然后从电源电压中减去这个总和，结果为零。出现这一结果的原因是串联电路电压降的总和总是等于电源电压。

公式（4-3）可以用于任意含有电压源和电阻器或其他负载的电路，关键思路是一个闭合的路径从任意一点出发又回到该点。在串联电路中，闭合路径总是包含电压源和一个或多个电阻器或其他负载。这种情况下，电源表示电压升，而每个负载则表示一个电压降，另一种表述串联电路基尔霍夫电压定律的方法是所有电压升之和等于所有电压降之和。

在串联电路中可以通过连接电路并测量每个电阻器的电压和电源电压来验证基尔霍夫电压定律，如图4-35所示。当电阻器电压加到一起时，它们的和将等于电源电压，串联电阻器的数量可以任意。

虽然这里只是对串联电路给出了基尔霍夫电压定律，但这个概念可以应用于任意电路。在复杂电路中，仍然可以写出基尔霍夫电压定律，但也有一种情况是在给定的闭环中没有电源电压。即便如此，基尔霍夫电压定律仍然适用，这将导致一个基尔霍夫电压定律更普遍的说法：**电路中沿任一闭合环路的电压代数和等于零。**

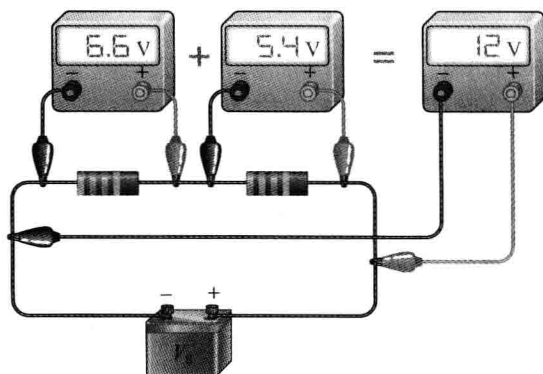


图4-35　基尔霍夫电压定律演示

如果存在电压源，它被当做求和式中的一项。求和时每一项的代数符号很重要，它表示了这个电压在绕行环路时是升还是降。写成等式形式

$$V_1+V_2+V_3+\cdots+V_n=0 \tag{4-4}$$

式（4-4）中的任一变量都能表示电压升或电压降。这个基尔霍夫电压定律的更一般形式可以写成下面更紧凑的形式

$$\sum_{i=1}^{n}V_i=0$$

这一表达式是公式（4-4）的速记方式，其中Σ的意思是从第一项（$i=1$）到最后一项（$i=n$）对电压求和。

这种形式的基尔霍夫电压定律可以应用到串联电路以外的其他电路，只要沿着一个闭合的路径即可。应用公式（4-4）时必须给路径中每个电压赋予一个代数符号，在串联电路以外的其他电路中，电阻器两端的电压要么表现为电压升要么为电压降，这取决于路径的选择。当我们遍历路径时，需要以一致的方式表示电压升和电压降。对于如图4-34所示的串联电路，主要思路是电源电压（升）等于负载（电阻器）两端电压（降）的总和。

【例4-13】　在图4-36中确定电源电压V_S，其中两个电压降已给定。

解： 根据基尔霍夫电压定律（公式4-3），电源电压（施加的电压）必须等于电压降之和，因此，对电压降求和可得电源电压值。

$$V_S=5V+10V=15V$$

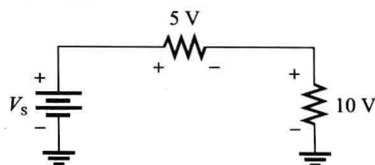


图4-36　例4-13图

相关问题：在图4-36中如果V_S增至30V，试问两个电压降是多少？

Multisim仿真

打开Mulitisim仿真文件E04-13，验证电压降等于V_S，对相关问题重复验证。

【例4-14】　在图4-37中确定未知的电压降V_3。

解： 根据基尔霍夫电压定律（公式4-4），绕电路的电压代数和等于零。

$$V_1+V_2+V_3+V_4=0$$

用$-V_S$替换V_4，则

$$V_1+V_2+V_3-V_s=0$$

解V_3

$$V_3=V_S-V_1-V_2=50V-12V-25V=13V$$

R_3两端的电压降V_3为13V，极性如图4-37所示。

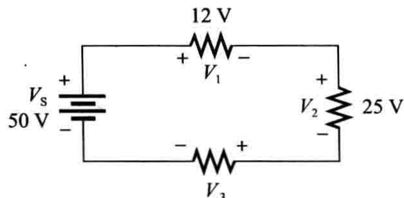


图4-37　例4-14图

相关问题：在图4-37中如果电源电压变为25V，试确定V_3。

Multisim仿真

打开Multisim仿真文件E04-14，验证V_3等于计算值，对相关问题重复验证。

【例4-15】 求图4-38中的R_4值。

解：本题中将应用欧姆定律和基尔霍夫电压定律。首先，利用欧姆定律求每个已知电阻器两端的电压降。

$$V_1=IR_1=10mA\times100\Omega=1.0V$$
$$V_2=IR_2=10mA\times470\Omega=4.7V$$
$$V_3=IR_3=10mA\times1.0k\Omega=10V$$

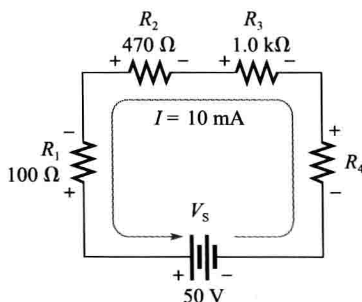


图4-38　例4-15图

接着，利用基尔霍夫电压定律求未知电阻器两端的电压降V_4。

$$V_S-V_1-V_2-V_3=0V$$
$$50V-1.0V-4.7V-10V-V_4=0V$$
$$34.3V-V_4=0V$$
$$V_4=34.3V$$

现在已经知道V_4，利用欧姆定律计算R_4。

$$R_4=\frac{V_4}{I}=\frac{34.3V}{10mA}=3.43k\Omega$$

R_4极可能为3.3kΩ标准值电阻器，因为3.43kΩ在3.3kΩ的标准容差内。

相关问题：在图4-38中如果$V_S=20V$，$I=10mA$，试确定R_4的值。

Multisim仿真

打开Multisim仿真文件E04-15，验证R_4计算值产生图4-38的电流。对相关问题重复验证。

本节测试题

1. 用两种方法表述基尔霍夫电压定律。
2. 50V电压源接到串联电阻电路上，试问该电路的电压降之和为多少？
3. 两个等阻值电阻器串联接在10V电池上，试问每个电阻器的电压降是多少？
4. 在一个25V电压源的串联电路中，有3个电阻器，一个电压降是5V，另一个是10V，试问第3个电压降的数值是什么？
5. 串联电路中各个电压降分别为1V、3V、5V、7V和8V，试问该串联电路两端的总电压降是多少？

4.7 分压器

串联电路可以作为一个分压器使用，分压器是串联电路的一个重要应用。

学习完本节内容，应该能够

● 用串联电路作分压器；

- 应用分压器公式；
- 使用电位器作可调分压器；
- 描述分压器的应用。

由一串电阻器组成的电路接到电压源上可用做分压器，图 4-39a 显示了两个电阻器串联的电路，尽管可以任意个电阻串联。我们知道，电路中有两个电压降：一个在 R_1 两端，另一个在 R_2 两端，在电路原理图上分别标记为 V_1 和 V_2。因为每个电阻器流过的电流相同，所以电压降与电阻值成正比，例如，若 R_2 的阻值是 R_1 的两倍，则 V_2 值是 V_1 的两倍。

沿环路的总电压降在串联电阻器上按正比于电阻值进行分配，最小的电阻具有最小的电压，而最大的电阻具有最大的电压（$V=IR$）。例如，在图 4-39b 中，若 V_S 为 10V，R_1 为 100Ω，R_2 为 200Ω，那么因为 R_1 是总电阻的 1/3，所以 V_1 得到 1/3 电压即 3.33V。类似地，因为 R_2 是总电阻的 2/3，所以 V_2 得到 2/3 电压即 6.67V。

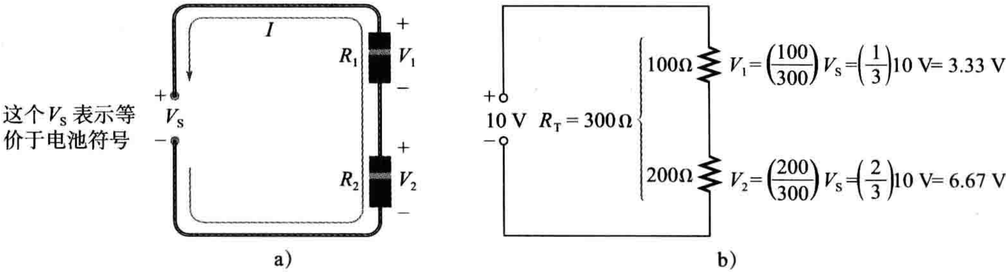


图 4-39 两电阻分压器举例

4.7.1 分压公式

经过几步计算就能导出电压在串联电阻上分配的公式。假设电路有 n 个串联电阻，如图 4-40 所示，其中 n 可以是任意整数。

设 V_x 表示任一电阻器两端的电压降，R_x 表示特定的电阻器或电阻器组合的值，根据欧姆定律，可将 R_x 两端电压降表示如下：

$$V_x = IR_x$$

流过电路的电流等于电源电压除以总电阻（$I=V_s/R_T$）。在图 4-40 所示的电路中，总电阻为

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$

在 V_x 表达式中用 V_S/R_T 替换 I，得到

$$V_x = \left(\frac{V_S}{R_T}\right)R_x$$

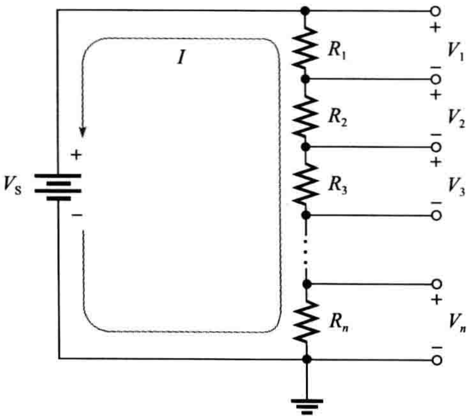


图 4-40 带有几个电阻的一般分压器

整理可得

$$V_x = \left(\frac{R_x}{R_T}\right)V_S \tag{4-5}$$

公式（4-5）是一般电压分配公式，可用文字表述如下：**串联电路中任一电阻或电阻组合两端的电压等于其电阻值与总串联电阻之比乘以电源电压。**

系统注释 闪存转换器

许多系统中将模拟信号转换为数字信号处理，这个过程使用模-数转换器（ADC），应用中

速度是关键，闪存转换器是最快的 ADC。

标准的闪存转换器使用由数百个电阻器组成的大规模分压器串设定一系列参考电压。例如，在一个分压器串中 8 位闪存转换器使用 255 个电阻器，其中的电阻必须非常准确，所以必须在集成电路内部仔细控制。输入模拟信号的同时与所有不同的电压进行比较，然后将最接近信号电平的电压数字化输出。

【例 4-16】　试确定图 4-41 所示电路中的 V_1（R_1两端的电压）和 V_2（R_2两端的电压）。

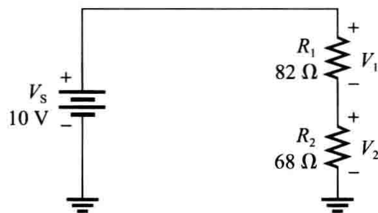


图 4-41　例 4-16 图

解：用分压公式 $V_x=(R_x/R_T)V_S$ 确定 V_1，其中 $x=1$，总电阻为

$$R_T=R_1+R_2=82\Omega+68\Omega=150\Omega$$

R_1为 82Ω，V_S为 10V，代入分压公式

$$V_1=\left(\frac{R_1}{R_T}\right)V_S=\frac{82\Omega}{150\Omega}\times 10V=5.47V$$

求 V_2有两种方法：基尔霍夫电压定律或分压公式。如果用基尔霍夫电压定律（$V_S=V_1+V_2$），代入 V_S、V_1值解 V_2

$$V_2=V_S-V_1=10V-5.47V=4.53V$$

用分压公式确定 V_2，此处 $x=2$

$$V_2=\left(\frac{R_2}{R_T}\right)V_S=\frac{68\Omega}{150\Omega}\times 10V=4.53V$$

相关问题：在图 4-41 中，如果 R_2变为 180Ω，试确定 R_1和 R_2两端的电压降。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E04-16，用万用表验证 V_1 和 V_2 的计算值。对相关问题重复验证。

【例 4-17】　计算图 4-42 所示电路中每个电阻两端的电压降。

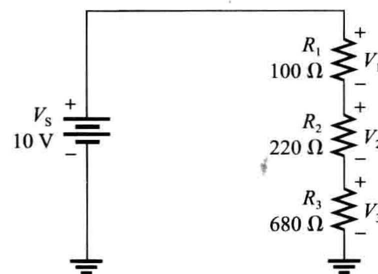


图 4-42　例 4-17 图

解：观察电路考虑下列条件：总电阻为 1000Ω，由于 R_1是总电阻的 10%（100Ω 是 1000Ω 的 10%），因此，它两端的电压是总电压的 10%。类似的，由于 R_2是总电阻的 22%（220Ω 是 1000Ω 的 22%），所以 R_2两端的电压是总电压的 22%，最后，R_3降了 68%的总电压（680Ω 是 1000Ω 的 68%）。

由于本例的数字简单，可以很容易心算出电压降（$V_1=0.1\times 10V=1V$，$V_2=0.22\times 10V=2.2V$，$V_3=0.68\times 10V=6.8V$）。

至此我们已经解决了问题，所用的计算为

$$V_1=\left(\frac{R_1}{R_T}\right)V_S=\frac{100\Omega}{1000\Omega}\times 10V=1V$$

$$V_2=\left(\frac{R_2}{R_T}\right)V_S=\frac{220\Omega}{1000\Omega}\times 10V=2.2V$$

$$V_3=\left(\frac{R_3}{R_T}\right)V_S=\left(\frac{680\Omega}{1000\Omega}\right)\times 10V=6.8V$$

注意，根据基尔霍夫电压定律，电压降之和等于电源电压，这是检查结果的好方法。

相关问题：在图 4-42 中，如果 R_1和 R_2都变为 680Ω，试问各电压降是多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E04-17，验证 V_1、V_2 和 V_3 的值，对相关问题重复验证。

【例 4-18】 在图 4-43 所示的电路中确定下列点之间的电压。

(a) A 到 B (b) A 到 C (c) B 到 C

(d) B 到 D (e) C 到 D

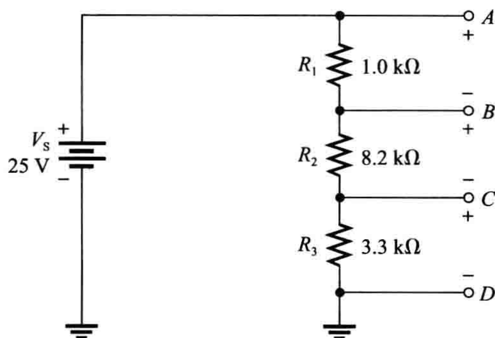


图 4-43 例 4-18 图

解： 首先确定 R_T

$$R_T=1.0\text{k}\Omega+8.2\text{k}\Omega+3.3\text{k}\Omega=12.5\text{k}\Omega$$

然后应用分压公式获得各个需要的电压。

(a) A 到 B 的电压也是 R_1 两端的电压

$$V_{AB}=\left(\frac{R_1}{R_T}\right)V_S=\frac{1.0\text{k}\Omega}{12.5\text{k}\Omega}\times 25\text{V}=2\text{V}$$

(b) A 到 C 的电压是 R_1 和 R_2 组合的电压降，这时，式 (4-5) 给出的一般公式中 R_x 是 R_1+R_2

$$V_{AC}=\left(\frac{R_1+R_2}{R_T}\right)V_S=\frac{9.2\text{k}\Omega}{12.5\text{k}\Omega}\times 25\text{V}=18.4\text{V}$$

(c) B 到 C 的电压是 R_2 两端的电压

$$V_{BC}=\left(\frac{R_2}{R_T}\right)V_S=\frac{8.2\text{k}\Omega}{12.5\text{k}\Omega}\times 25\text{V}=16.4\text{V}$$

(d) B 到 D 的电压是 R_2 和 R_3 组合的电压降，这时，一般公式中 R_x 是 R_2+R_3

$$V_{BD}=\left(\frac{R_2+R_3}{R_T}\right)V_S=\frac{11.5\text{k}\Omega}{12.5\text{k}\Omega}\times 25\text{V}=23\text{V}$$

(e) 最后 C 到 D 的电压是 R_3 两端的电压

$$V_{CD}=\left(\frac{R_3}{R_T}\right)V_S=\frac{3.3\text{k}\Omega}{12.5\text{k}\Omega}\times 25\text{V}=6.6\text{V}$$

如果把分压器连接起来，可以在相应点之间接电压表来验证计算的电压值。

相关问题：如果 V_S 加倍，请确定前面的各个电压。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E04-18，验证 V_{AB}、V_{AC}、V_{BC}、V_{BD} 和 V_{CD} 的值，对相关问题重复验证。

4.7.2 用做可调分压器的电位器

回顾第 2 章的介绍，电位器是一个具有 3 个端的可调电阻器。如图 4-44 所示，一个线性电位器接到电压源上，注意两个终端分别标记为 1 和 2，可调端或滑动端标记为 3。电位器作为一个分压器，能如图 4-44c 所示将总电阻分成两部分，1 端和 3 端之间的电阻（R_{13}）为一部分，而 3 端和 2 端之间的电阻（R_{32}）为另一部分。因而，电位器就像一个可手动调节的两电阻分压器。

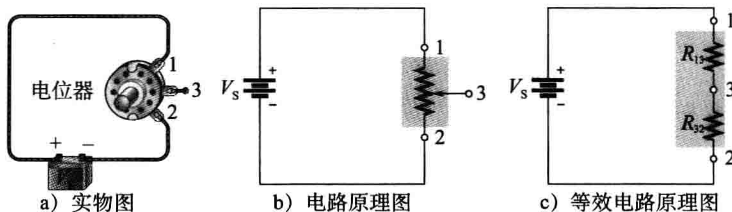


图 4-44 用做分压器的电位器

图 4-45 显示了当滑动端 3 移动时发生的现象，图 4-45a 中滑动端处于中间点，两个部分电阻相同，若如图所示测量 3 端和 2 端之间的电压，得到总电源电压的一半。当滑动端如

图 4-45b所示从中间点向上滑动，3 端和 2 端之间电阻增大，这两端之间电压等比例增大。当滑动端如图 4-45c 所示从中间点向下滑动，3 端和 2 端之间电阻减小，电压等比例减小。

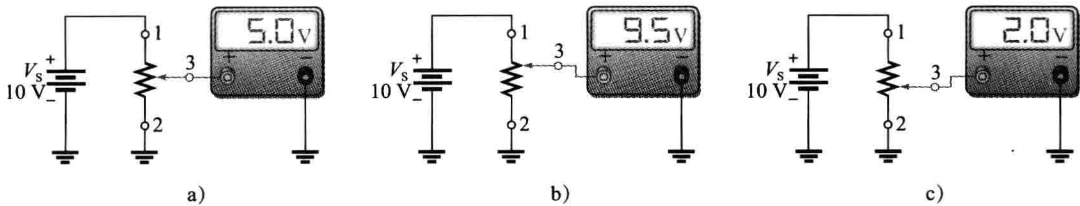


图 4-45 调节分压器

4.7.3 应用

在系统中分压器有很多应用，收音机可视为一个小型系统，音量控制是电位器用做分压器的常见应用。由于声音的大小取决于音频电压大小，因此，可以通过调节电位器来增大或减小音量，也就是通过转动音量控制旋钮调节音量。图 4-46 的方框图示出了如何用电位器控制音量。

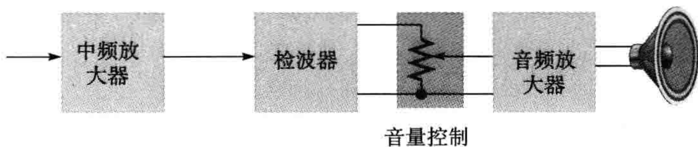


图 4-46 在收音机中可变分压器用做音量控制

图 4-47 显示了如何把电位器分压器用做储存罐中的液位传感器。如图 4-47a 所示，浮子随着储罐的加料或排料上下移动。将浮子机械连接到电位器的滑动臂上，如图 4-47b 所示。输出电压正比于滑动臂的位置而变化，随着储罐中液体的减少，传感器输出电压也减小。输出电压送往指示电路，其控制的数字读出显示储罐中的液体量。电路原理图如图 4-47c 所示。

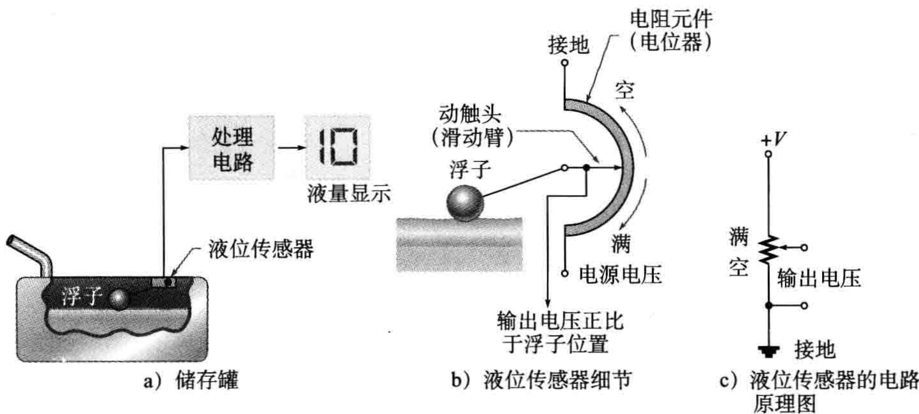


图 4-47 电位器分压器用做液位传感器

分压器的另一个应用是用来设置运算放大器的增益和设置电源的参考电压。在一些精密应用中，分压器做成 IC 形式。另外，分压器还用来设置晶体管放大器的直流工作电压（偏置）。图 4-48 显示了使用的分压器。

分压器在将电阻传感器输出转换为电压中很有用，电阻传感器如 2.5 节中所述，包括热敏

电阻器、光电导和应变计。要将电阻的变化转换为输出电压，可以把电阻传感器的电阻用做分压器的一个电阻。

【例 4-19】 假设 CdS（硫化镉元件，一种光敏电导）的配置如图 4-49 所示，使用 3 节 AA 电池作电压源（4.5 V）。黑暗时，CdS 的电阻从低电阻升至 90kΩ 以上，用来触发逻辑电路，如果 V_{OUT} 大于 1.5 V，将灯点亮。当 CdS 电阻为 90kΩ 时，试问 R 为多大能产生 1.5V 的输出电压？

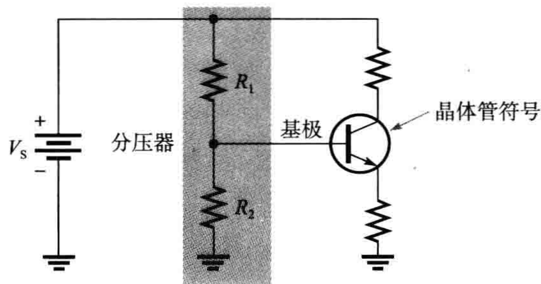


图 4-48 分压器用做晶体管放大器偏置电路

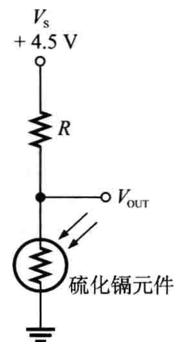


图 4-49 CdS 的配置

解： 注意阈值电压（1.5V）是电源电压的 1/3，所以，90kΩ 代表总电阻的 1/3。因此，总电阻为

$$R_T = 3 \times 90\text{k}\Omega = 270\text{k}\Omega$$

产生 1.5V 输出电压所需的电阻是

$$R = R_T - 90\text{k}\Omega = 180\text{k}\Omega$$

相关问题：从公式（4-5）出发，证明：当 CdS 电阻为 90kΩ 时，产生 1.5V 输出电压所需的电阻为 180kΩ。

本节测试题

1. 什么是分压器？
2. 在串联分压器电路中能有多少电阻器？
3. 写出分压公式的一般形式。
4. 如果两个等值电阻串联接在 20V 电压源上，每个电阻两端的电压是多少？
5. 由 56kΩ 电阻器和 82kΩ 电阻器组成分压器，电源电压为 10V，试画出电路并确定每个电阻器两端的电压。
6. 图 4-50 所示的电路是一个可调分压器，如果电位器是线性的，试问：为了从 B 到 A 获得 5V 电压及从 C 到 B 获得 5V 电压，滑动端应置于何处？

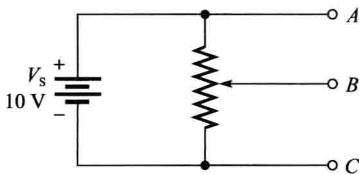


图 4-50 可调分压器的电路

4.8 串联电路的功率

在串联电路中，每个电阻器消耗的功率都贡献给电路总功率，各个电阻的功率是叠加的。学习完本节内容，应该能够

- 确定串联电路的功率；
- 应用功率公式。

串联电阻电路的总功率等于串联各电阻器功率之和。

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n \quad (4\text{-}6)$$

其中，P_T为总功率，P_n为串联电路最后一个电阻功率（n可以是任意整数，代表串联电阻器的数量）。

第 3 章学习的功率公式可应用于串联电路。由于串联电路中每个电阻的电流相同，可用下列公式计算总功率：

$$P_T = V_S I$$

$$P_T = I^2 R_T$$

$$P_T = \frac{V_S^2}{R_T}$$

式中，I 为流过串联电路的电流，V_S为串联电路的电源电压，R_T为串联电路的总电阻。

【例 4-20】　试确定图 4-51 所示串联电路的总功率。

解：电源电压为 15V，总电阻为

$$R_T = 10\Omega + 12\Omega + 56\Omega + 22\Omega = 100\Omega$$

由于已知 V_S 和 R_T，所以最容易使用的公式是 $P_T = V_S^2/R_T$

$$P_T = \frac{V_S^2}{R_T} = \frac{(15\text{V})^2}{100\Omega} = \frac{225\text{V}}{100\Omega} = 2.25\text{W}$$

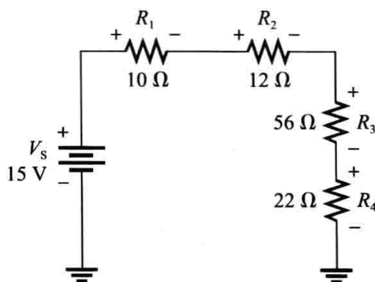


图 4-51　例 4-20 图

如果分别计算每个电阻的功率，然后加起来，可得到相同的结果。下面演示另一种计算方法，首先求电流。

$$I = \frac{V_S}{R_T} = \frac{15\text{V}}{100\Omega} = 150\text{mA}$$

然后用 $P = I^2R$ 计算每个电阻的功率：

$$P_1 = (150\text{mA})^2 \times 10\Omega = 225\text{mW}$$

$$P_2 = (150\text{mA})^2 \times 33\Omega = 270\text{mW}$$

$$P_3 = (150\text{mA})^2 \times 56\Omega = 1.26\text{W}$$

$$P_4 = (150\text{mA})^2 \times 22\Omega = 495\text{mW}$$

现在把 3 个功率加起来得到总功率。

$$P_T = 225\text{mW} + 270\text{mW} + 1.26\text{W} + 495\text{mW} = 2.25\text{W}$$

结果证明，各个功率之和等于由公式 $P_T = V_S^2/R_T$ 确定的总功率。

相关问题：如果 V_S增大至 30V，试问图 4-51 所示电路的总功率是多大？

本节测试题

1. 如果已知串联电路中每个电阻的功率，试问如何求总功率？
2. 串联电路的电阻器的功率分别为：1W、2W、5W 和 8W，问电路的总功率是多少？
3. 电路由 100Ω、300Ω 和 600Ω3 个电阻串联，流过电路的电流为 1mA，问电路的总功率是多少？

4.9　电压测量

第 2 章中介绍了参考接地的概念，并指定其为 0V 用做电路的参考点。电压总是电路中一点相对于另一点进行测量的。本节中将更详细地讨论接地。

学习完本节内容，应该能够

- 说出如何测量对地电压；
- 给出术语参考地的定义；
- 解释表示电压时单、双下标的用法。

术语接地起源于电话系统，在该系统中一根导线是地球本身。该术语早期也用于无线接收天线，其中系统的一部分被连接到打入地下的金属管。现在接地的含义有所不同，并不一定是与地球有相同的电势。在电子系统中，*参考接地*（或公共端）是指电路中测量电压的比较点导体。通常情况下，接地导体承载返回电源的电流，大多数电子电路板有一层较大面积的用于接地的导电表面区，对于许多多层电路板，这一表面区是一个单独的内层，作为接地面。

电气布线的参考接地通常与地电位相同，因为中性线和接地在建筑物的入口点相连。这种情况下，参考接地和接地具有相同的电位。（国家电气规程（NEC）第517条规定了针对医院手术室和卫生保健设施的这种接地方法有些例外。）

参考接地的概念也可用于汽车电气系统。大多数汽车系统中，汽车的底盘是接地参考（即使轮胎与大地绝缘，可以有不同的电位）。几乎所有现代汽车电池的负极都用低电阻固体连接到底盘，这使得底盘被当做汽车所有电气电路的电流返回通路，如图4-52所示。某些老爷车中，将安排电池的正端连接到底盘，称为正地。在这两种情况下，底盘都代表了参考接地点。

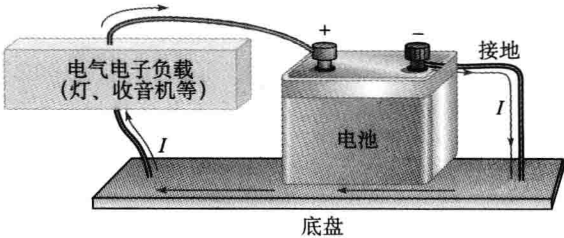


图4-52 汽车中将底盘用做电路的返回通路

安全提示 从汽车取出电池时，首先要拆除接地线。这样，如果某个工具不小心与底盘和正极端接触，将可避免打火，因为没有返回路径，也就没有了电流。安装电池时，总是最后安装接地连接，以避免工具不小心接触底盘产生火花。

测量对地电压

当电压是对地测得时，用单字母下标来标记。例如，V_A是A点对地的电压。图4-53所示的每个电路都包含3个1.0kΩ串联电阻和4个标记的参考点，参考地表示相对于电路中所示其他所有点的电位为0V。图4-53a的参考点为D，所有对D的电压均为正。图4-53b的参考点为A，所有其他点的电压均为负。

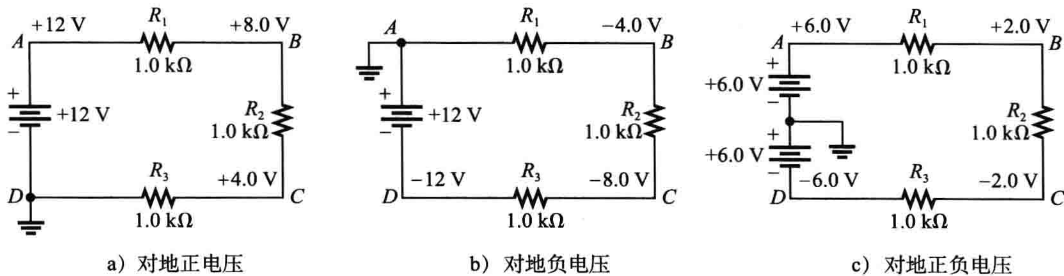


图4-53 接地点不影响电路的电流和电阻两端电压

如前所述，许多电路同时使用正电压和负电压，电源的返回路径被指定为参考接地。图4-53c显示了一个相同的电路，但用顺向串联的两个6V电源替换12V电源。在这种情况下，将参考点任意指定在两个电压源之间。3个电路电流是完全一样的，但现在电压却是相对于新的参考接地点。从这些例子中可以看到，参考接地点可以任意，它不会改变电流。

并非所有电压都是对地测得的，若要标记一个不接地电阻两端的电压，就要给该电阻下标命名或使用双字母下标。当使用两个不同字母下标时，电压表示两点之间的电压差。例如，V_{BC}意思是V_B-V_C，在图 4-53 中，所有电路里的V_{BC}都是相同的（+4.0V），可以通过两个电压相减确定，标记V_{BC}的另一种方法是简记为V_{R_2}。

还有一个常用的对使用下标表达电压的习惯约定，电源电压通常使用双字母下标，参考点为接地或公共端。例如，写成V_{CC}的电压为相对于接地的正电源电压，其他常用电源电压有V_{DD}（正）、V_{EE}（负）和V_{SS}（负）。

用数字电压表测量电压，表笔跨接在任意两点上，电压表指示正或负的电压。电压表参考插孔标为“COM”（通常为黑色），它仅代表电压表的公共端而不是电路的公共端。图 4-54 显示了用 DMM 测量非接地（浮动）电阻器R_2两端电压的连接，电路和图 4-53b 给出的相同，具有负电源，在实验室就可以这样做。注意，电压表指示为负电压，这意味着电压表的 COM 接线更加正。若要测量相对于电路参考接地的电压，应将电压表的 COM 接到电路的参考接地，这样显示的电压才是相对于电路参考接地的。

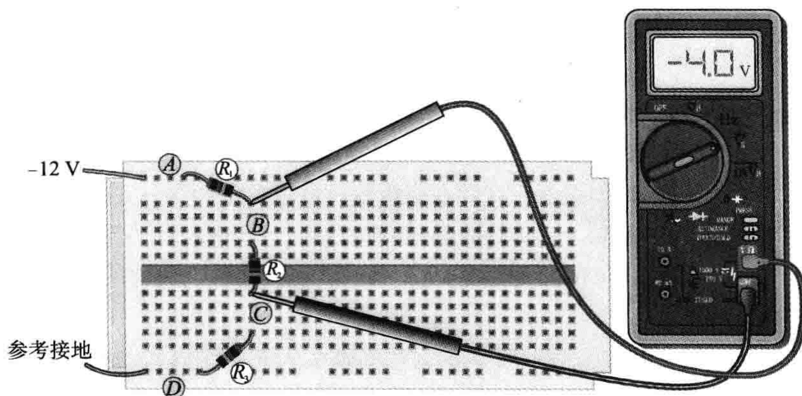


图 4-54　DMM 公共端“浮动”，引线可接电路中任意点并指示两引线之间正确的电压

如果使用模拟电表作电路测量，必须把其公共端接到电路中最负的点，否则表头指针将向反方向偏转。图 4-55 显示了前面同样的电路中模拟电压表的接法，注意这里两个表笔的接法

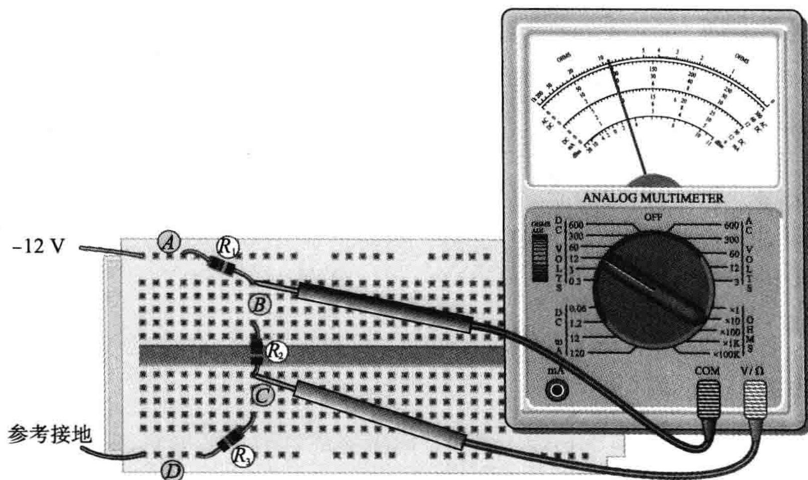


图 4-55　模拟表必须将正极引线接到电路中较为正的点

是反的。为了测量 R_2 两端的电压，引线连接必须确保电表将沿正方向偏转，电表的正引线应接到电路中较为正的点，这里就是电路的接地端，使用者在读取示数时要加上一个负号。

【例 4-21】 试确定图 4-56 各个电路中每个点对地的电压。由于 4 个电阻阻值相同，25V 均匀降在每个电阻两端。

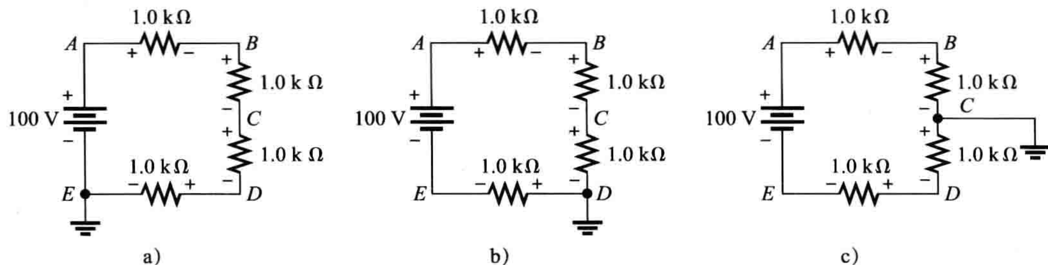


图 4-56 例 4-21 图

解： 图 4-56a 电路的电压极性如图所示，E 点为接地。使用单字母下标标记的对地电压如下：

$$V_E=0\text{V},\ V_D=+25\text{V},\ V_C=+50\text{V},\ V_B=+75\text{V},\ V_A=+100\text{V}$$

图 4-56b 电路的电压极性如图所示，D 点为接地。对地电压如下：

$$V_E=-25\text{V},\ V_D=0\text{V},\ V_C=+25\text{V},\ V_B=+50\text{V},\ V_A=+75\text{V}$$

图 4-56c 电路的电压极性如图所示，C 点为接地。对地电压如下：

$$V_E=-50\text{V},\ V_D=-25\text{V},\ V_C=0\text{V},\ V_B=+25\text{V},\ V_A=+50\text{V}$$

相关问题：如果将图 4-56a 的接地点移到 A 点，试问其他各点对地的电压为多大？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E04-21，验证各点对地的电压值，对相关问题重复验证。

本节测试题

1. 电路中参考点称为什么？
2. 如果电路中 V_{AB} 为+5.0V，试问 V_{BA} 为多大？
3. 电路中电压一般都参考接地的。(T 或 F)
4. 外壳或底盘可以用做参考接地。(T 或 F)

4.10 故障排除

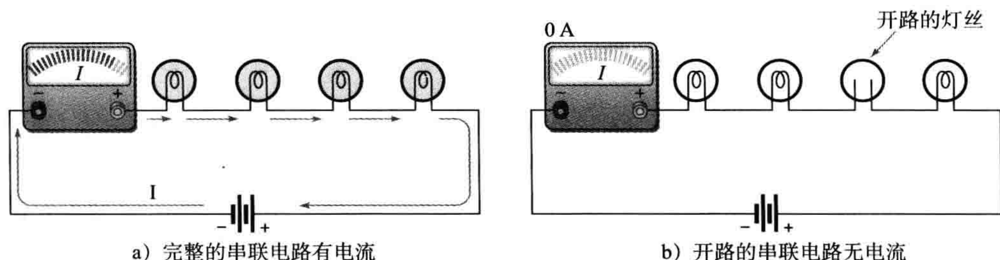
在所有电路中，元件或接触开路与导体间短路是最常见的问题。开路产生无限大电阻，而短路则产生接近零的电阻。

学习完本节内容，应该能够

- 对串联电路进行故障排除；
- 在电路中检查开路；
- 在电路中检查短路；
- 识别开路与短路的主要原因。

4.10.1 开路

串联电路中最常见的错误是*开路*。例如，电阻器或灯泡烧坏时将产生开路，破坏电流通路，如图 4-57 所示。**串联支路中的开路阻止电流流动。**



a）完整的串联电路有电流　　b）开路的串联电路无电流

图 4-57　发生开路时电流停止

排除开路故障　第 3 章介绍了分析、规划、测量（APM）的故障排除方法，还学习了半分法和使用欧姆表的例子。现在，应用同样的原理，只是用电压测量替换电阻测量，电压测量通常是最容易的，因为不必断开什么。

作为开始步骤，在分析之前最好目视检查有故障的电路，用这种方法有时可发现烧焦的电阻、断了灯丝的灯泡、导线松脱或连接松散。但是，可能（并且可能更常见）电阻器或其他部件开路了却出现看得见的损坏迹象。若目视检查什么都没有发现，再按 APM 方法进行。

串联电路发生开路时，电源电压全部降落在开路点上。原因是开路阻止了串联电路的电流，没有电流，任何其他的电阻器（或其他元件）两端也没有电压。因为 $IR=(0\text{A})\times R=0\text{V}$，电阻器的每个端电压都相同，因此，加给串联电路的电压全部呈现在开路元件两端，没有其他电压降，如图 4-58 所示。根据基尔霍夫电压定律，电源电压将出现在开路电阻两端：

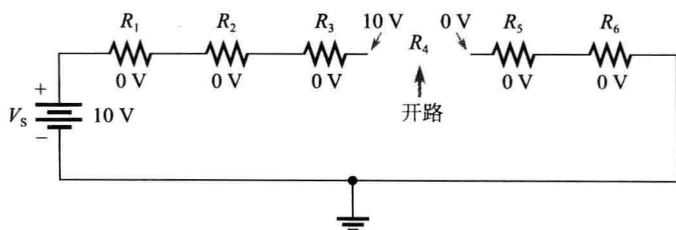


图 4-58　电源电压呈现在开路串联电阻两端

$$V_S=V_1+V_2+V_3+V_4+V_5+V_6$$
$$V_4=V_S-V_1-V_2-V_3-V_5-V_6=10V-0V-0V-0V-0V-0V$$
$$V_4=V_S=10\text{V}$$

小贴士　测量电阻时，应确保不碰仪表引线或电阻引线。如果用手指与电表探头一起抓住高值电阻的两端，则测量是不准确的，因为人体电阻会影响测量值。当人体电阻与高阻值电阻并联时，测量值将低于实际电阻值。

使用电压测量的半分法举例　假设电路有四个电阻串联，通过分析症状（有电压但没有电流）已经确定一个电阻器开路，现在计划使用电压表按半分法测量来找出开路的电阻，这一特定情况的测量顺序如图 4-59 所示。

第一步：测量 R_1 和 R_2 两端（电路的左半边），0V 读数表示没有电阻开路。

第二步：将电压表移到 R_3 和 R_4 两端，读数为 10V，表示电路右半边有一个开路，所以 R_3 或 R_4 是故障电阻（假设没有不好的连接）。

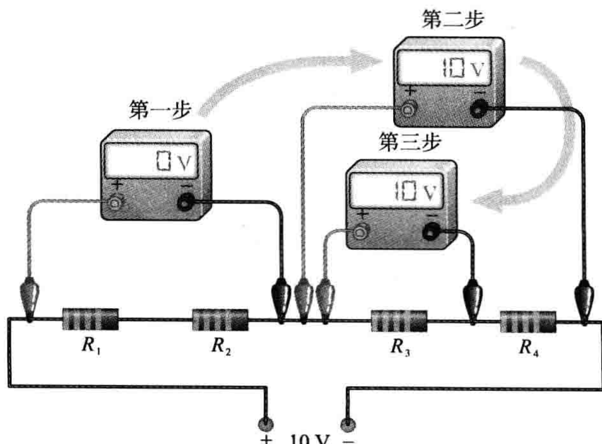


图 4-59　用半分法排除串联电路的开路故障

第三步：将电压表移到 R_3 两端，测得 R_3 两端电压为 10V，判断它为开路电阻。如果测量 R_4 两端电压，将显示 0V，这同样表明 R_3 是故障元件，因为它是剩下唯一的元件，两端电压一定是 10V。

4.10.2 短路

有时由于两个导体或异物的触碰，例如焊料或裁剪的导线等，会意外地将电路两个部分连接一起，造成不希望的短路，这种情况在元件密度高的电路中比较常见。三种可能在印制电路板上导致短路的原因如图 4-60 所示。

发生短路时，串联电阻的一部分被旁路（所有电流通过这个短路通道），从而降低了总电阻，如图 4-61 所示。注意，短路的结果是电流增大。串联电路中短路导致电流增大。

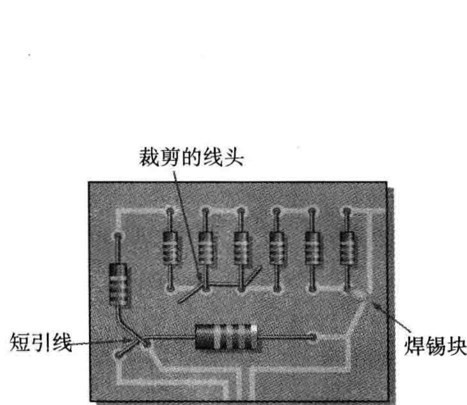


图 4-60 印制电路板上短路举例

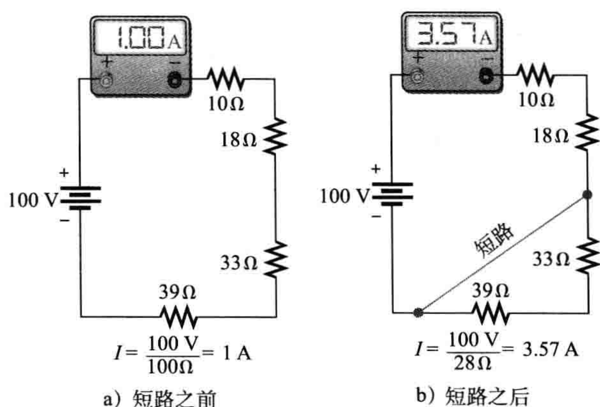


图 4-61 串联电路中短路的后果

排除短路故障 短路故障排除一般很困难，任何故障排除，最好都要对故障电路进行目视检查。在电路存在短路的情况下，目视检查常能发现裁剪线头、焊锡渣或接触线这些罪魁祸首。在元件故障中，相比于各类的元件开路，短路却不太常见。此外，电路某部分短路引起大电流可能会导致另一部分过热，结果开路和短路故障可能会同时出现。

串联电路发生短路时，短路部分两端基本上没有电压。短路的电阻为零或接近零，虽然短路有时也会有一定电阻，这类短路称为电阻性短路。为说明方便，假设所有短路都是零电阻。

为了排除短路故障，可测量各个电阻两端的电压直至发现读数为 0V 的元件，这是一种直接方法，没有使用半分法。为应用半分法，必须知道电路中每个点正确的电压，以便与测量值比较。例 4-22 显示了用半分法排除短路故障的过程。

【例 4-22】 假设已经确认含 4 个串联电阻的电路存在短路，因为电流比它应有值大，已知正常工作时电路中各点的电压值，如图 4-62 所示，各电压都是相对于电源的负极端。请找出短路位置。

解： 利用半分法排除短路故障。

第一步：测量 R_1 和 R_2 两端。电压表读数为 6.67V，高于正常值（应该是 5V）。由于短路将使电压低于正常值，因此需要在别处寻找低于正常的电压。

第二步：将电压表移到 R_3 和 R_4 两端测量。3.33V 的读数不正确，低于正常值（应该是 5V），这表示短路落在电路的右半边，R_3 或 R_4 短路。

第三步：再将电压表移到 R_3 两端测量。读数为 3.3V，告诉我们 R_4 为开路电阻，因为它两端的电压一定是 0V。图 4-63 说明了这个故障排除方法。

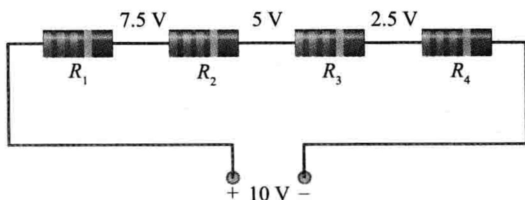


图 4-62　带有正确电压标记的串联电路（无短路）

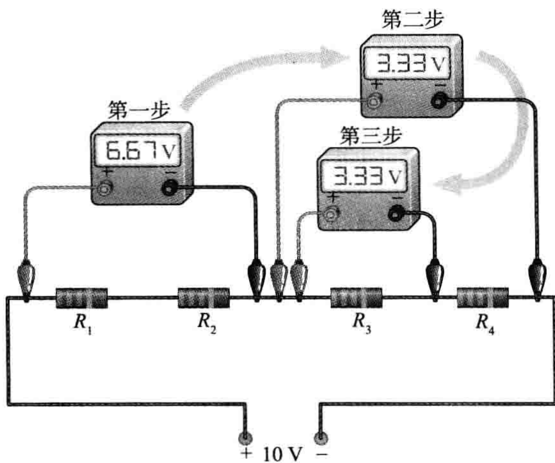


图 4-63　用半分法排除串联电路短路故障

相关问题：假设在图 4-63 中 R_1 短路，试问第一步测量应该是多少？

本节测试题

1. 给出开路的定义。
2. 给出短路的定义。
3. 串联电路时会发生什么情况？
4. 试给出实际发生开路的两种一般途径的名称。短路又是如何发生的？
5. 当电阻器损坏一般将开路。（T 或 F）
6. 一串电阻器两端的总电压为 24V，如果某个电阻器开路，则这个电阻器两端的电压为多大？其他各个好的电阻器两端电压是多大？
7. 解释为什么在图 4-63 中第一步测量的电压高于正常值。

本章小结

- 在串联电路中，串联总电阻等于所有电阻之和。
- 串联电路两点之间的总电阻等于所有接在这两点之间串联连接的电阻之和。
- 如果串联电路所有电阻器的阻值相同，则总电阻为电阻器的数量乘以单个电阻器的电阻值。
- 串联电路所有点的电流相同。
- 串联电压源代数相加。
- 基尔霍夫电压定律：串联电路的电压降之和等于总电源电压。
- 基尔霍夫电压定律：绕一个闭合环路的所有电压代数和等于零。
- 电路中电压降总是与总电源电压极性相反。
- 电流定义为从电源的负极侧流出并流进正极侧。
- 电流定义为流入每个电阻器的负极侧并从正极侧流出。
- 分压器是接到电压源的一个电阻器串联结构。
- 之所以成为分压器，是因为串联电路任一电阻器的电压都是从总电压中按照其电阻在总电阻中的比例分出来的。
- 电位器可以用做可调分压器。
- 电阻电路的总功率等于构成串联电路的所有各个电阻器功率之和。
- 单字母下标给出的电压是相对于接地而言的；当下标用两个不同字母时，则表示两点之间的电压差。
- 接地（公共端）电压为零伏，电路中其他各点电压都是相对于这个点的。
- 负极接地是电源的负极侧接地时所使用的术语。
- 正极接地是电源的正极侧接地时所使用的术语。
- 开路元件两端的电压总是等于电源电压。
- 短路元件两端的电压总是 0V。

关键术语

基尔霍夫电压定律（Kirchhoff's voltage law） 定律说明围绕一个闭合路径的电压降总和等于在该闭合路径中的电源电压；围绕一个闭合路径的所有电压代数和为零。

开路（Open） 电流通路被切断的电路条件。

参考接地（Reference ground） 房屋结构的金属底座或印制电路板上的导电面积作为电压参考点，又称为公共端（com）。

串联（Series） 电路中的元件连接关系，其中元件在两点之间连接形成一个单一的电流通路。

顺向串联（Series-aiding） 两个或多个电压源以相同的极性方向串联连接。

反向串联（Series-opposing） 两个电压源以相反的极性方向串联连接。

短路（Short） 两点之间路径电阻值为零或异常低的电阻路径：通常为异常状况。

分压器（Voltage divider） 由串联电阻器构成的电路，在其两端得到一个或多个输出电压。

关键公式

(4-1) $R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$　　n 个电阻器串联的总电阻

(4-2) $R_T = nR$　　n 个等值电阻器串联的总电阻

(4-3) $V_S = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n$　　串联电路中的基尔霍夫电压定律

(4-4) $V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n = 0$　　基尔霍夫电压定律

(4-5) $V_x = \left(\frac{R_x}{R_T}\right)V_S$　　分压器公式

(4-6) $P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n$　　总功率

是非测验题

1. 串联电路具有多条电流通路。
2. 串联电路的总电阻小于该电路中的最大电阻器阻值。
3. 如果两个串联电阻器大小不同，则大电阻具有大电流。
4. 如果两个串联电阻器大小不同，则大电阻具有大电压。
5. 如果3个等值电阻器用做分压器，则每个电阻器两端的电压将是电源电压的1/3。
6. 没有充分的电气理由在安装手电筒电池时采用反向串联。
7. 基尔霍夫电压定律只对含有电源的环路有效。
8. 分压器公式可以写成 $V_x = (R_x/R_T)V_S$ 。
9. 串联电路中电阻器消耗的功率与电源提供的功率相同。
10. 如果 A 点电压为+10V，B 点电压为−2V，则 V_{AB} 为+8V。

自测题

1. 5个等值电阻器串联连接，流入第一个电阻器的电流为2mA，则流出第二个电阻器的电流量为
   (a) 2mA　(b) 1mA
   (c) 4mA　(d) 0.4mA
2. 欲测量由4个串联电阻器组成的电路中第三个电阻器流出的电流，电流表应该放置在
   (a) 第三与第四电阻器之间
   (b) 第二与第三电阻器之间
   (c) 电源的正极端
   (d) 电路的任一点
3. 若第三个电阻和两个串联电阻器串联，则总电阻为
   (a) 保持相同　(b) 增大
   (c) 减小　(d) 增大1/3
4. 当4个串联电阻器之一从电路中移去重新连接电路时，则电流
   (a) 按流过被移去电阻的电流量减小
   (b) 减小1/4
   (c) 4倍
   (d) 增大
5. 3个电阻器组成串联电路，阻值分别为100Ω、

220Ω 和 330Ω，总电阻值为

(a) 小于 100Ω　(b) 电阻值的平均值

(c) 550Ω　(d) 650Ω

6. 9V 电池接在 68Ω、33Ω、100Ω 和 47Ω 电阻的串联电路两端，电流量为

(a) 36.3mA　(b) 27.6mA

(c) 22.3mA　(d) 363mA

7. 放 4 节 1.5V 电池进手电筒里时，不小心放反了一节电池，则灯将

(a) 比正常亮　(b) 比正常暗

(c) 不亮　(d) 和正常一样

8. 若测量串联电路的所有电压降和电源电压，把它们加在一起然后考虑其极性，将得到的结果是

(a) 电源电压

(b) 电压降总和

(c) 零

(d) 电源电压和电压降的总和

9. 给定的串联电路含有 6 个电阻器，每个电阻的电压降都是 5V，电源电压是

(a) 5V　(b) 30V

(c) 取决于电阻值　(d) 取决于电流

10. 串联电路由 4.7kΩ、5.6kΩ 和 10kΩ 电阻器组成，两端具有最大电压的电阻器是

(a) 4.7kΩ　(b) 5.6kΩ

(c) 10kΩ　(d) 给定的条件无法确定

11. 下列串联组合两端接 100V 电源，试问哪个消耗的功率最大?

(a) 一个 100Ω 电阻器

(b) 二个 100Ω 电阻器

(c) 3 个 100Ω 电阻器

(d) 4 个 100Ω 电阻器

12. 某电路由 5 个等值电阻器串联组成，总功率为 1W，每个电阻器消耗

(a) 1W　(b) 5W

(c) 0.5W　(d) 0.2W

13. 在串联电阻电路中接入电流表，接通电源后电流表指示为零，应检查

(a) 导线断开　(b) 短路电阻

(c) 开路电阻　(d) (a) 和 (c)

14. 在检查串联电阻电路时，发现电流高于其应有值，应该查找

(a) 开路　(b) 短路

(c) 低阻值　(d) (b) 和 (c)

故障排除：征兆与原因

参考图 4-64，给每一组征兆确定原因。

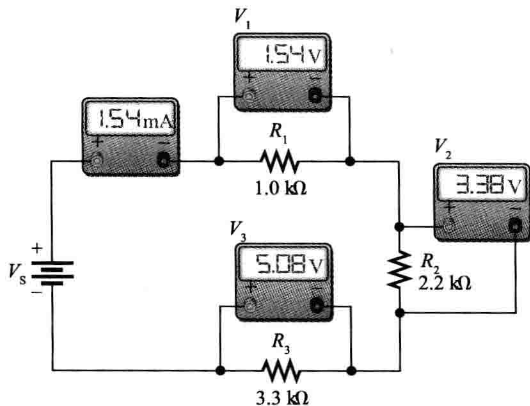


图 4-64　电表指示电路的正确读数

1. 征兆：电流表读数为零，电压表 1 和电压表 3 读数为零，电压表 2 读数为 10V。

原因：(a) R_1 开路

(b) R_2 开路

(c) R_3 开路

2. 征兆：电流表读数为零，所有电压表读数均为零。

原因：(a) 有电阻开路

(b) 电压源关闭或故障

(c) 某个电阻值过高

3. 征兆：电流表读数为 2.33mA，电压表 2 读数为零。

原因：(a) R_1 短路

(b) 电压源设置过高

(c) R_2 短路

4. 征兆：电流表读数为零，电压表 1 读数为 0V，电压表 2 读数为 5V，电压表 3 读数为 5V。

原因：(a) R_1 短路

(b) R_1 和 R_2 开路

(c) R_2 和 R_3 开路

5. 征兆：电流表读数为 0.645mA，电压表 1 读数过高，另两个电压表读数过低。

原因：(a) R_1 为错误的 10kΩ 阻值

(b) R_2 为错误的 10kΩ 阻值

（c）R_3为错误的10kΩ阻值

习题

基本习题

4.1 节

1. 将图4-65所示的各个电阻器串联接到A、B两点之间。

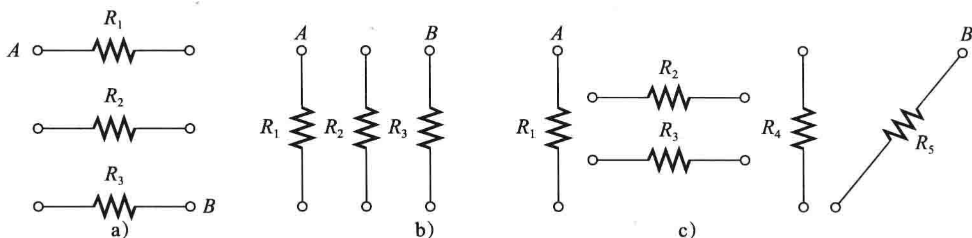


图4-65　习题1图

2. 确定图4-66中哪些电阻串联，说明如何连接引脚使所有电阻串联。

3. 确定图4-66所示电路板中引脚1和引脚8之间的电阻。其中，电阻R_1的色环颜色分别为红、红、棕、金；电阻R_2的色环颜色分别为橙、橙、棕、金；电阻R_3的色环颜色分别为橙、橙、棕、金；电阻R_4的色环颜色分别为绿、黄、棕、金；电阻R_5的色环颜色分别为棕、黑、红、金；电阻R_6的色环颜色分别为红、红、黑、金；电阻R_7的色环颜色分别为橙、橙、橙、金；电阻R_8的色环颜色分别为棕、灰、黑、金；电阻R_9的色环颜色分别为黄、紫、棕、金；电阻R_{10}的色环颜色分别为红、红、红、金；电阻R_{11}的色环颜色分别为灰、红、红、金；电阻R_{12}的色环颜色分别为棕、黑、黑、金；电阻R_{13}的色环颜色分别为蓝、棕、橙、金；电阻R_{14}的色环颜色分别为黄、紫、棕、金；电阻R_{15}的色环颜色分别为棕、黑、红、金；电阻R_{16}的色环颜色分别为红、红、橙、金；

4. 确定图4-66所示电路板中引脚2和引脚3之间的电阻。

4.2 节

5. 一个82Ω电阻器和一个56Ω电阻器串联，试问总电阻为多大？

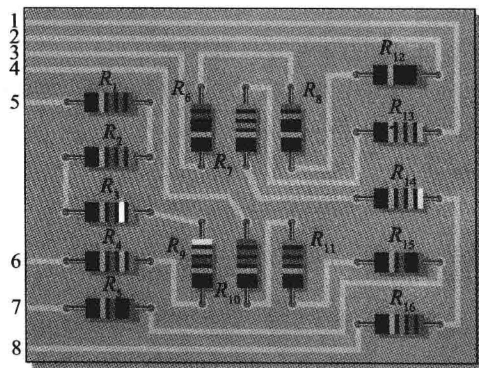


图4-66　习题2～习题4、习题11和习题12图

6. 求图4-67所示每一组串联电阻器的总电阻。图4-67a中电阻R_1的色环颜色分别为：绿、蓝、棕、银；电阻R_2的色环颜色分别为：棕、黑、红、银；图4-67b中电阻R_1的色环颜色分别为：红、紫、黑、银；电阻R_2的色环颜色分别为：橙、橙、黑、银；图4-67c中电阻R_1的色环颜色分别为：红、红、红、银；电阻R_2的色环颜色分别为：棕、绿、红、银；电阻R_3的色环颜色分别为：棕、黑、橙、金；图4-67d中电阻R_1的色环颜色分别为：棕、黑、绿、银；电阻R_2的色环颜色分别为：棕、黑、黄、银；电阻R_3的色环颜色分别为：棕、银、红、金；电阻R_4的色环颜色分别为：棕、黑、红、金。

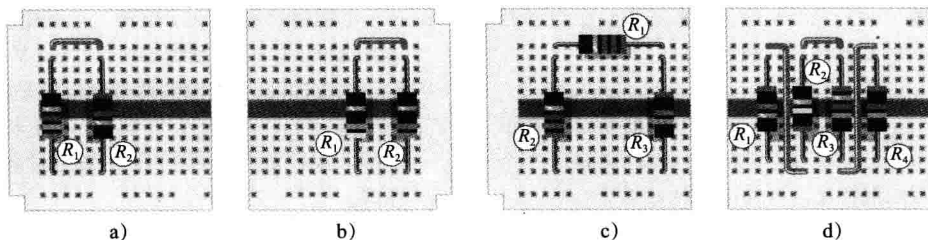


图 4-67　习题 6 图

7. 求图 4-68 中每个电路的 R_T。说明如何用欧姆表测量 R_T。

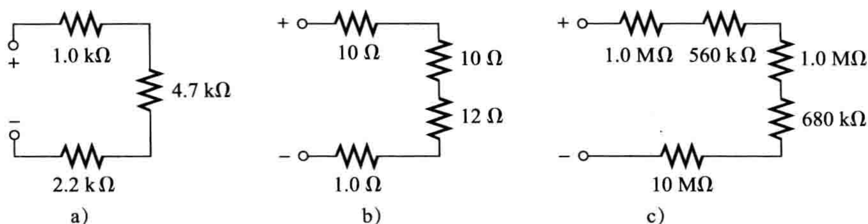


图 4-68　习题 7 图

8. 试问 12 个 5.6kΩ 电阻串联的总电阻为多少？
9. 6 个 47Ω、8 个 100Ω、两个 22Ω 电阻器串联，总电阻为多少？
10. 图 4-69 的总电阻为 20kΩ，试问 R_5 的值是多少？

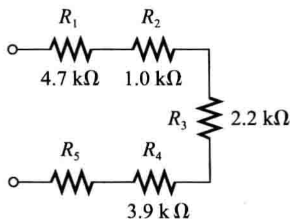


图 4-69　习题 10 图

11. 试确定图 4-66 所示的 PC 板上下列每组引脚之间的电阻。
    (a) 引脚 1 和引脚 8　(b) 引脚 2 和引脚 3
    (c) 引脚 4 和引脚 7　(d) 引脚 5 和引脚 6
12. 如果图 4-66 中所有电阻器都串联起来，试问总电阻为多少？

4.3 节

13. 若 4 个电阻串联电路的电源电压为 12V、总电阻为 120Ω，试问流过每个电阻的电流为多少？
14. 图 4-70 所示的电源流出的电流为 5mA，试问电路中每个毫安表的指示分别为多少？

4.4 节

15. 试问图 4-71 中每个电路的电流分别为多少？说明每个电路中电流表如何接。

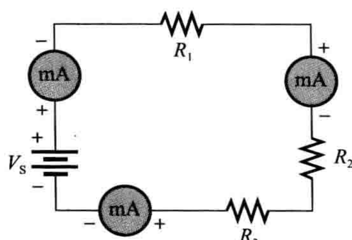


图 4-70　习题 14 图

16. 确定图 4-71 中每个电阻两端的电压。

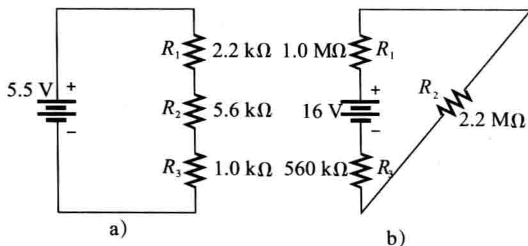


图 4-71　习题 15、习题 16 图

17. 3 个 470Ω 电阻串联接在 48V 电源上
    (a) 有多大电流？
    (b) 每个电阻两端的电压是多少？
    (c) 电阻器的最小额定功率是多少？
18. 4 个等值电阻器串联在 5V 电源上，测得电流为 5mA，试问每个电阻值为多少？

4.5 节

19. 说明如何将 4 个 6V 电池连接得到 24V 电压。

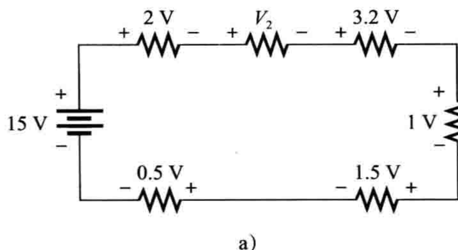
20. 在习题19中，如果不小心将其中一个电池接反了，会发生什么现象？

4.6 节

21. 3个电阻器串联电路中各个电阻器两端测得下列电压：5.5V、8.2V 和 12.3V，试问这3个串联电阻器连接的电源电压值是多少？

22. 5个电阻器串联在20V电源上，其中4个电阻器两端的电压分别是1.5V、5.5V、3V 和6V，试问第五个电阻器两端的电压是多少？

23. 试确定图 4-72 所示各电路中的未知电压(降)，说明如何连接电压表来测量各未知电压降。



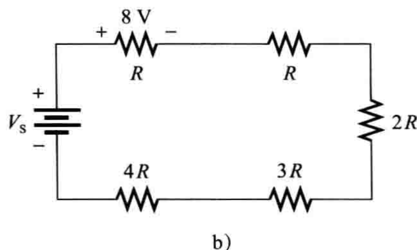


图 4-72 习题 23 图

4.7 节

24. 串联电路的总电阻为500Ω，则在22Ω串联电阻器两端的电压在总电压中的百分比是多少？

25. 求图 4-73 所示的每个分压器中 A、B 之间的电压。

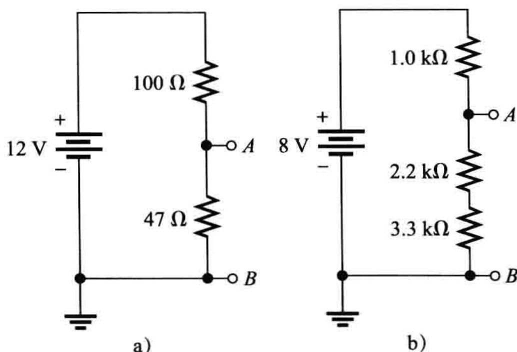


图 4-73 习题 25 图

26. 试确定图 4-74a 中 A、B 和 C 对地的电压。

27. 试确定从图 4-74b 分压器输出的最大和最小电压。

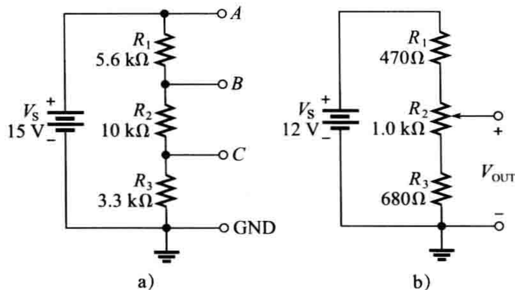


图 4-74 习题 26、习题 27 图

28. 试问图 4-75 中每个电阻两端的电压是多少？其中 R 是最低值，其他都是 R 的标记倍数。

29. 试问图 4-76b 中面包板上每个电阻器两端的电压是多少？其中，电阻 R_1 的色环颜色分别为：绿、蓝、红、金；电阻 R_2 的色环颜色分别为：棕、黑、红、银；电阻 R_3 的色环颜色分别为：绿、蓝、棕、金；电阻 R_4 的色环颜色分别为：棕、黑、橙、金。

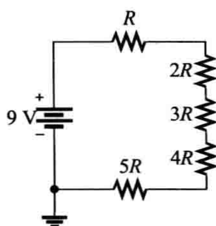
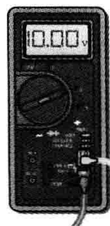
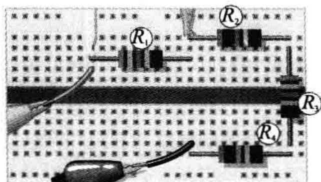


图 4-75 习题 28 图



a) 接线到面包板的万用表



b) 带万用表接线和电源接线的面包板

图 4-76 习题 29、习题 31 图

4.8 节

30. 有 5 个串联电阻器，每个消耗功率 50mW，试问总功率是多少？
31. 求图 4-76 所示电路的总功率。

4.9 节

32. 试确定图 4-77 所示电路各点对地的电压。
33. 在图 4-78 中，如果不直接把电压表接到 R_2 两端，试问怎样通过测量确定 R_2 两端的电压？

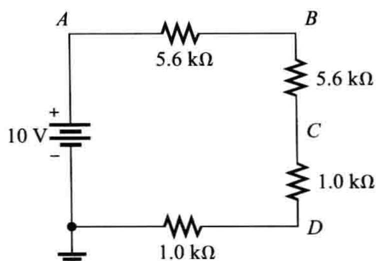


图 4-77　习题 32 图

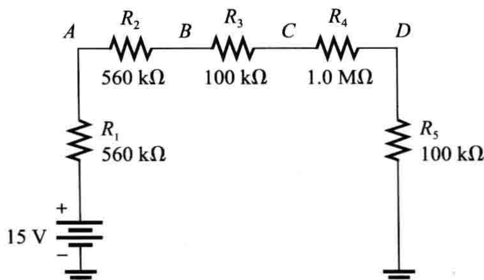


图 4-78　习题 33～习题 36 图

34. 试确定图 4-78 所示电路中各点对地的电压。
35. 在图 4-78 中，试问 V_{AC} 为何值？
36. 在图 4-78 中，试问 V_{CA} 为何值？

4.10 节

37. 通过观察图 4-79 中的电表，试确定电路中的故障种类并确定哪个元件出现故障。
38. 请问图 4-80 中的万用表读数正确吗？如果不正确，出了什么问题？图 4-80b 中电阻 R_1 的色环颜色分别为：红、红、红、金；电阻 R_2 的色环颜色分别为：灰、红、红、金；电阻 R_3 的色环颜色分别为：棕、红、橙、金；电阻 R_4 的色环颜色分别为：绿、蓝、红、金；电阻 R_5 的色环颜色分别为：棕、黑、橙、金。

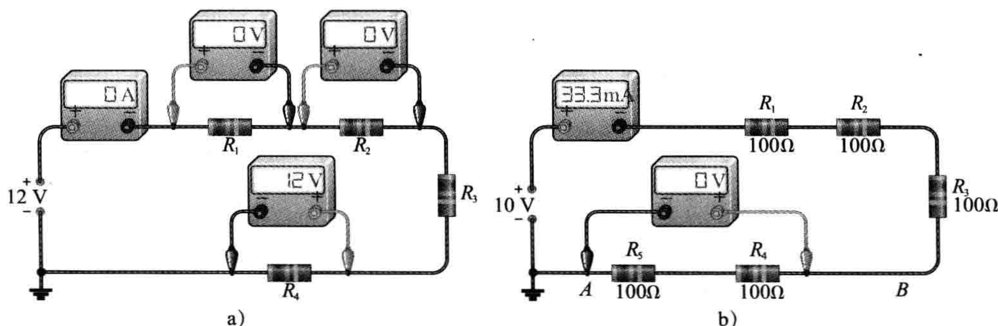
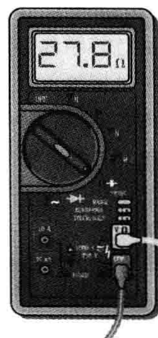
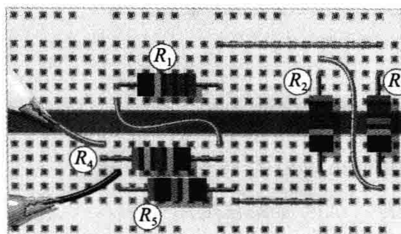


图 4-79　习题 37 图



a) 接线到面包板的万用表



b) 带万用表接线的面包板

图 4-80　习题 38 图

高级习题

39. 在图4-81所示的电路中，请确定未知电阻值（R_3）。

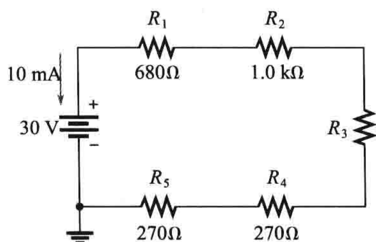


图4-81 习题39图

40. 实验室里有下列可用阻值的电阻器且数量不限：10Ω、100Ω、470Ω、680Ω、1.0kΩ、2.2kΩ和5.6kΩ，其他标准值电阻器都缺货，而现在项目需要一个18kΩ电阻，请问如何组合现有电阻来获得所需的电阻？

41. 试确定图4-82中各点对地的电压。

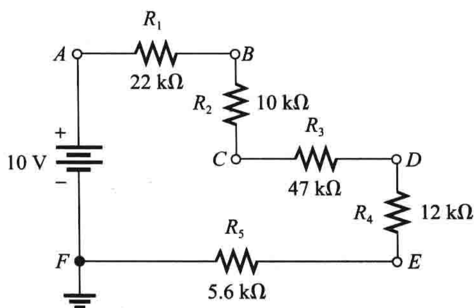


图4-82 习题41图

42. 求图4-83中所有未知量。

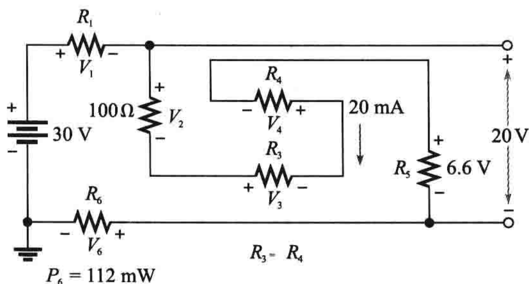


图4-83 习题42图

43. 总电阻1.5kΩ的串联电路电流为250mA，若电流必须降低25%，试问需要在电路中加入多大的串联电阻？

44. 下列4个1/2W电阻串联：47Ω、68Ω、100Ω和120Ω，试问有一个电阻超过额定功率的最大电流是多少？如何电流超过最大值哪个电阻最先烧坏？

45. 某串联电路由下列电阻组成：一个1/8W电阻器、一个1/4W电阻器和一个1/2W电阻器，总电阻为2400Ω，若每个电阻器均工作在最大功率水平，试确定

(a) I

(b) V_S

(c) 每个电阻值

46. 用若干1.5V电池、一个开关、3个灯泡设计一个电路，用单个开关控制将4.5V电压加到一个灯泡、两个灯泡串联、3个灯泡串联上，请画出电路原理图。

47. 设计一个可调分压器，用120V电源输出从最小10V到最大100V电压，最大电压输出时电位器设置在最大电阻，最小电压输出时电位器设置在最小电阻（零欧姆），电流为10mA。

48. 用附录A给出的标准值电阻设计一个分压器，相对于30V电源负极端提供下列大致输出电压：8.18V、14.7V和24.6V，电源电流限制不超过1mA，电阻器的数量、阻值和额定功率必须指明，画出带有电阻值的电路原理图。

49. 在图4-84所示的双面印制电路板上，分辨每一组串联电阻并确定其总电阻，需要注意的是许多互连馈线从板的顶层连到底层。其中，电阻R_1的色环颜色分别为：红、红、红、金；电阻R_2的色环颜色分别为：黄、紫、红、金；电阻R_3的色环颜色分别为：棕、黑、红、金；电阻R_4的色环颜色分别为：绿、蓝、红、金；电阻R_5的色环颜色分别为：橙、白、红、金；电阻R_6的色环颜色分别为：橙、橙、红、金；电阻R_7的色环颜色分别为：绿、蓝、棕、金；电阻R_8的色环颜色分别为：黄、紫、棕、金；电阻R_9的色环颜色分别为：灰、红、红、金；电阻R_{10}的色环颜色分别为：棕、黑、红、金；电阻R_{11}的色环颜色分别为：棕、黑、橙、金；电阻R_{12}的色环颜色分别为：蓝、灰、红、金。

50. 试问图4-85中开关在每个位置时从A到B的总电阻是多少？

51. 请确定图4-86中每一个开关位置电表测得的电流。

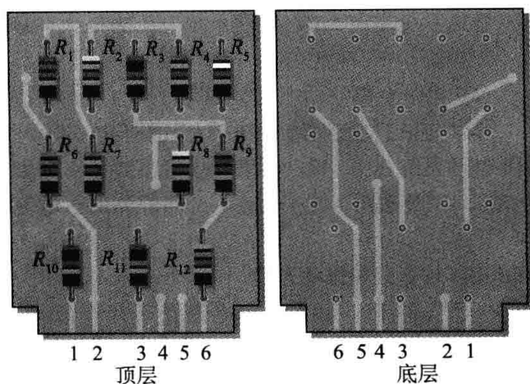


图 4-84 习题 49、习题 54、习题 55、习题 56 和习题 57 图

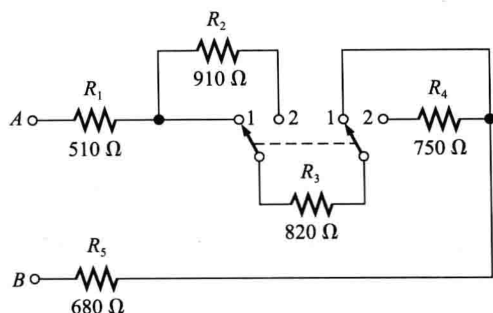


图 4-85 习题 50 图

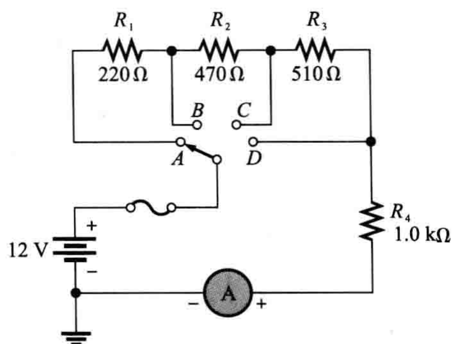


图 4-86 习题 51 图

52. 试确定图 4-87 中联动开关在各个位置时由电表测得的电流。

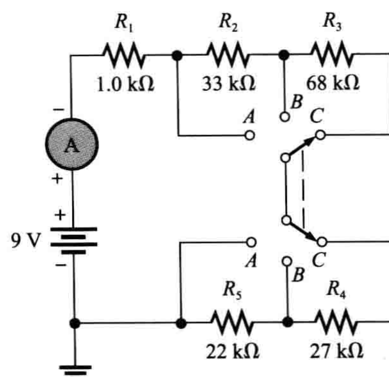


图 4-87 习题 52 图

53. 在图 4-88 中，当开关在 D 位置时流过 R_5 的电流为 6mA，试确定开关在各个位置时每个电阻两端的电压。

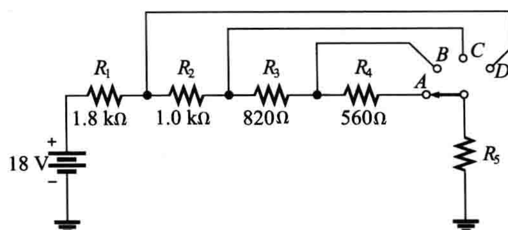


图 4-88 习题 53 图

54. 表 4-1 列出了图 4-84 所示印制电路板上的电阻测量结果，试问这些结果是否正确？如果不正确，请识别可能出现的问题。

55. 在图 4-84 所示的印制电路板上测得引脚 5 和 6 之间的电阻为 15 kΩ，试问这是否指示有问题？如果有，请识别之。

表 4-1 印制电路板上的测量结果

引脚对	电阻	引脚对	电阻
1 和 2	∞	2 和 6	∞
1 和 3	∞	3 和 4	∞
1 和 4	4.23kΩ	3 和 5	∞
1 和 5	∞	3 和 6	∞
1 和 6	∞	4 和 5	∞
2 和 3	23.6kΩ	4 和 6	∞
2 和 4	∞	5 和 6	19.9kΩ
2 和 5	∞		

56. 检查图4-84所示的印制电路板时测得引脚1和2之间的电阻为17.83 kΩ，同样测得引脚2和4之间的电阻为13.6kΩ，试问这是否指示印制电路板有问题？如果有，请识别故障。
57. 在图4-84所示的印制电路板上，把引脚2接到引脚4、引脚3接到引脚5，将3组串联电阻互相串联形成单一串联电路，电压源接在引脚1和引脚6之间，电流表串联在电路中，随着电源电压增大，观察到电流随之增大，突然，电流降到零并闻到烟味，假设所电阻器额定功率都是1/2W。
   (a) 出现什么问题？
   (b) 解决这个问题必须特别做什么？
   (c) 在什么电压值会出现这个问题？
58. 参考系统举例4-1，如果在电动机运转时磁场线圈开路，会发生什么？
59. 参考系统举例4-1，假设转子有2Ω电阻，电阻R_1、R_2和R_3都是10Ω，设V_S为12V，试问电动机最开始起动（位置1）的电流是多大？
60. 参考系统举例4-2，假设系统电压为最大（17组模块588V），功率为4250W。
   (a) 第一个模块的电流是多大？
   (b) 与最后一个模块的电流相比如何？
61. 参考系统举例4-2，如果有一组模块照不到太阳，只能输出5.0A电流，试问阵列的总电流会怎样？

Multisim 仿真故障排除习题

62. 打开文件P04-62，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
63. 打开文件P04-63，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
64. 打开文件P04-64，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
65. 打开文件P04-65，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
66. 打开文件P04-66，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
67. 打开文件P04-67，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。

各节测试题答案

4.1 节

1. 串联电阻器端与端相连接成一“串”。
2. 串联电路只有单一的电流路径。
3. 见图4-89。
4. 见图4-90。

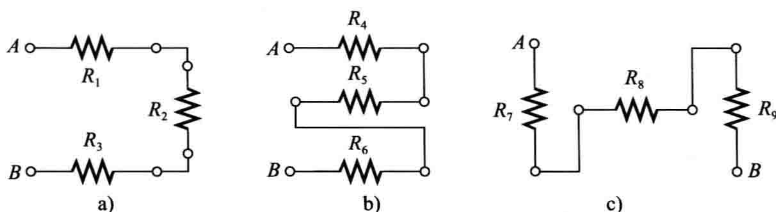


图4-89 测试题3答案

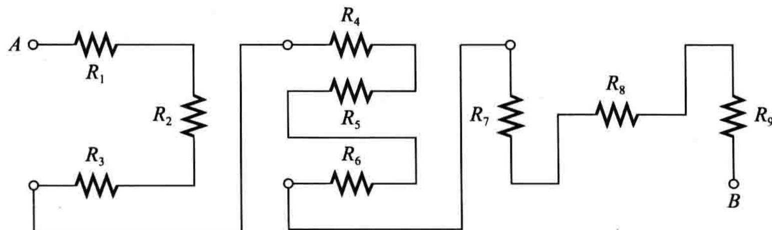


图4-90 测试题4答案

4.2 节

1. (a) $R_T = 33\Omega + 100\Omega + 10\Omega = 143\Omega$
   (b) $R_T = 39\Omega + 56\Omega + 10\Omega = 105\Omega$
   (c) $R_T = 820\Omega + 2200\Omega + 1000\Omega = 4020\Omega$
2. $R_T = 100\Omega + 2\times47\Omega + 4\times12\Omega + 330\Omega = 572\Omega$
3. $10k\Omega - 8.8k\Omega = 1.2k\Omega$
4. $R_T = 12\times47\Omega = 564\Omega$

4.3 节

1. 串联电路各点电流相同。
2. 流过 47Ω 电阻的电流为 20mA。
3. C、D 间为 50mA；E、F 间为 50mA。
4. 电流表 1 指示 17.9mA，电流表 2 指示 17.9mA。

4.4 节

1. $I=6V/3000\Omega=0.020A=20mA$
2. $V=5mA\times43\Omega=215mV$
3. $V_1=5mA\times10\Omega=50mV$
   $V_2=5mA\times15\Omega=75mV$
   $V_3=5mA\times18\Omega=90mV$
4. $R=1.25V/4.63mA=270\Omega$
5. $R=130\Omega$

4.5 节

1. 60V/12V =5；见图 4-91。

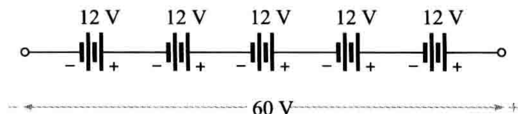


图 4-91　测试题 1 答案

2. $V_T=4\times1.5V=6.0V$
3. 见图 4-92。

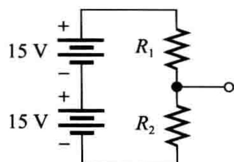


图 4-92　测试题 3 答案

4. $V_{S(总)}=6V+15V=21V$
5. 3.0V

4.6 节

1. 基尔霍夫电流定律：
   (a) 绕闭合通路的电压代数和为零。
   (b) 电压降之和等于总电源电压。
2. $V_{R(总)}=V_S=50V$
3. $V_{R_1}=V_{R_2}=10V/2=5V$
4. $V_{R_3}=25V-5V-10V=10V$
5. $V_S=1V+3V+5V+7V+8V=24V$

4.7 节

1. 分压器是由二个或多个电阻组成的串联电路，其中，任一电阻或电阻组合两端的电压与其电阻值成正比。
2. 两个或多个电阻器构成分压器。
3. $V_x=(R_x/R_T)V_S$为分压器一般公式。
4. $V_R=20V/2=10V$
5. 见图 4-93，$V_{R_1}=(56k\Omega/138k\Omega)\times10V=4.06V$，$V_{R_2}=(82k\Omega/138k\Omega)\times10V=5.94V$。

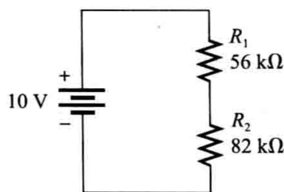


图 4-93　测试题 5 答案

6. 将电位器设置在中间点。

4.8 节

1. 将每个电阻器的功率相加得到总功率。
2. $P_T=1W+2W+5W+8W=16W$
3. $P_T=(1mA)^2\times(100\Omega+330\Omega+680\Omega)=1.11mW$

4.9 节

1. 接地。
2. −5.0V
3. T。
4. T。

4.10 节

1. 开路是电流通路的断开。
2. 短路是绕过电路一部分的零电阻路径。
3. 当串联电路开路时电流停止。
4. 开路可由元件故障或连接故障产生。短路可由裁剪线头、焊锡块等造成。
5. T。
6. 开路 R 两端为 24V；其他电阻器两端为 0V。
7. 由于 R_4 短路，其他电阻两端的电压比正常值大，总电压被三个等值电阻器分压。

例题中相关问题答案

例 4-1　(a) R_1 左端接 A 端，R_1 右端接 R_3 上端，R_3 下端接 R_5 右端，R_5 左端接 R_2 左端，R_2 右端接 R_4 右端，R_4 左端接 B 端。

(b) $R_1=1.0k\Omega$、$R_2=33k\Omega$、$R_3=39k\Omega$、$R_4=470\Omega$、$R_5=22k\Omega$

例 4-2　两个串联电路串联连接，所以板上电阻全

部串联。

例 4-3 258Ω（不变）

例 4-4 12.1kΩ

例 4-5 22kΩ

例 4-6 4.36kΩ

例 4-7 18.5mA

例 4-8 7.8V

例 4-9 $V_1=1V$，$V_2=3.3V$，$V_3=2.2V$，$V_S=6.5V$，$V_{S(max)}=32.5V$

例 4-10 275Ω

例 4-11 6V

例 4-12 见图 4-94。

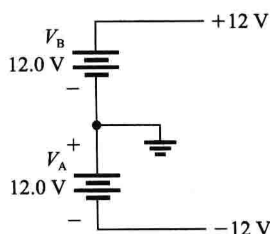


图 4-94 例 4-12 相关问题答案

例 4-13 10V，20V

例 4-14 6.5V

例 4-15 430Ω

例 4-16 $V_1=3.13V$，$V_2=6.87V$

例 4-17 $V_1=V_2=V_3=3.33V$

例 4-18 $V_{AB}=4V$，$V_{AC}=36.8V$，$V_{BC}=32.8V$，$V_{BD}=46V$，$V_{CD}=13.2V$

例 4-19 $V_x=\left(\frac{R_x}{R_T}\right)V_S$

$$\frac{V_x}{V_S}=\frac{R_x}{R_T}=\frac{R_x}{R+R_x}$$

$$\frac{1.5V}{4.5V}=\frac{90k\Omega}{R+90k\Omega}$$

$$1.5V\times(R+90k\Omega)=4.5V\times 90k\Omega$$

$$1.5R=270\Omega$$

$$R=180\Omega$$

例 4-20 9W

例 4-21 $V_A=0V$，$V_B=-25V$，$V_C=-50V$，$V_D=-75V$，$V_E=-100V$

例 4-22 3.33V

是非测验题答案

1.F 2.F 3.F 4.T 5.T 6.T 7.F 8.T 9.T 10.F

自测题答案

1.（a） 2.（d） 3.（b） 4.（d） 5.（d） 6.（a） 7.（b） 8.（c） 9.（b） 10.（c）
11.（a） 12.（d） 13.（d） 14.（d）

故障排除：征兆与原因的答案

1.（b） 2.（b） 3.（c） 4.（c） 5.（a）

第5章 并联电路

本章目标

- 识别并联电路
- 确定并联总电阻
- 确定每条并联支路两端的电压
- 在并联电路中应用欧姆定律
- 应用基尔霍夫电流定律
- 利用并联电路作分流器
- 确定并联电路的功率
- 并联电路故障排除

本章首先介绍欧姆定律在并联电路中的应用，然后介绍基尔霍夫电流定律。此外，还将介绍一些并联电路的系统应用，包括汽车照明、住宅供电线路和控制电路。本章还要学习如何确定总的并联电阻及如何排除电阻开路故障。

当电阻器并联连接并在并联电路两端加上电压时，每个电阻器都提供一个单独的电流路径。当多个电阻器并联连接时，并联电路的总电阻减小，每个并联电阻两端的电压等于整个并联电路上施加的电压。

5.1 电阻器并联

当两个或两个以上电阻器分别连接在两个相同点之间时，称它们相互并联。并联电路为电流提供了多条通路。

学习完本节内容，应该能够

- 识别并联电阻电路；
- 将并联电阻器的物理布局转换成电路原理图。

电路中的每个并联通路称为一个*支路*。两个电阻器并联如图 5-1a 所示。如图 5-1b 所示，电源的电流输出（I_T）到达 B 点时分为两路，I_1从 R_1通过，而 I_2从 R_2通过，两个电流在 A 点汇合返回。如果再增加并联电阻器支路，则将提供更多电流通路，如图 5-1c 所示。顶部蓝色显示所有的点都是电气上的相同点 A，而底部所有的点都是电气上的相同点 B。

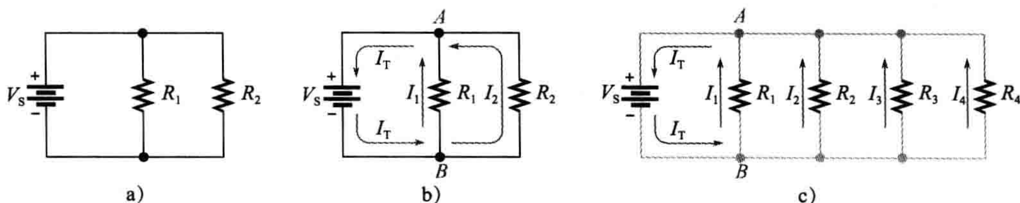


图 5-1 电阻器并联

在图 5-1 中，电阻器的并联很明显，但是，在实际电路图中并联的关系常常不很清晰，重要的是不管电路中怎么画，必须学会怎样辨别出并联电路。

识别并联电路的规则如下：如果两点之间有一个以上的电流路径（支路），且这两点之间的电压都加在每条支路上，那么，这两个点之间存在并联电路。

图 5-2 显示了标记为 A 和 B 的两点之间并联电阻器的不同画法。注意，每种情况下从 A

到 B 都有两条路径，而且每条支路的电压相同。虽然这些图只有两个并联路径，但可以推广到更多并联路径的情况。

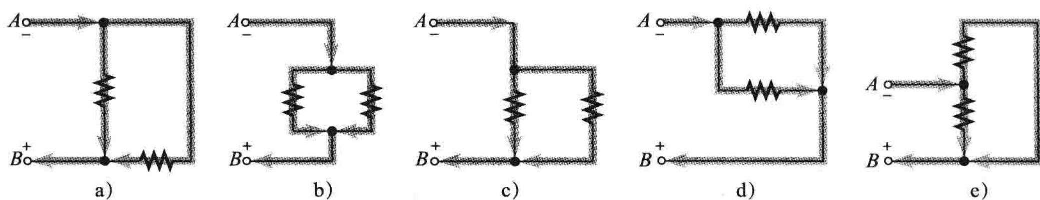


图 5-2　含两条并联路径的电路举例

【例 5-1】　置于面包板上的 5 个电阻如图 5-3 所示。指出将所有电阻器并联连接在 A 和 B 之间所需的布线，绘制电路原理图并标注出每一个电阻器的值。其中，电阻 R_1 的色环颜色分别为：棕、黑、红、金；电阻 R_2 的色环颜色分别为：红、红、红、金；电阻 R_3 的色环颜色分别为：灰、红、棕、金；电阻 R_4 的色环颜色分别为：红、紫、红、金；电阻 R_5 的色环颜色分别为：棕、黑、红、金。

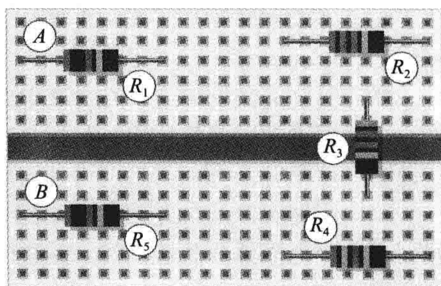
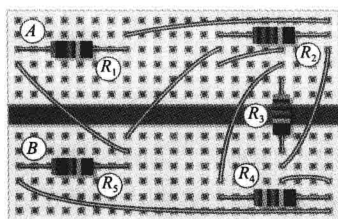
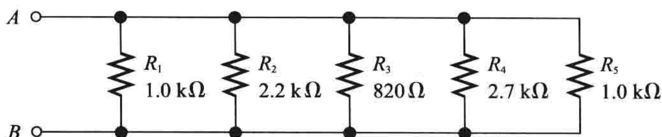


图 5-3　例 5-1 图

解： 接线图如图 5-4a 所示，电路原理图如图 5-4b 所示，根据色码标注了电阻器的电阻值。另外要注意，电路原理图并不一定要展现电阻器实际的物理排列，原理图只是给出元件的电气连接。



a）装配接线图



b）电路原理图

图 5-4　例 5-1 的接线

相关问题：如果 R_2 被删除，试问电路需要重新连接吗？

【例 5-2】　确定图 5-5 中并联的分组及每个电阻器的值。其中，R_1、R_2、R_3、R_4 和 R_{11}、R_{12} 的阻值相同，R_5、R_6、R_7、R_8、R_9、R_{10} 的阻值相同。电阻 R_1 的色环颜色分别为：绿、蓝、橙、金；电阻 R_5 的色环颜色分别为：棕、黑、黄、金。

解： 电阻器 R_1 到 R_4 与 R_{11}、R_{12} 并联，这组并联接在引脚 1 和引脚 4 之间，每个电阻器的阻值均为 56kΩ。

电阻器 R_5 到 R_{10} 并联，这组并联接在引脚 2 和引脚 3 之间，每个电阻器的阻值均为 100kΩ。

相关问题：如何在印制电路板上把所有电阻器都并联起来？

本节测试题

1. 并联电路中电阻器如何连接？
2. 怎样辨别并联电路？
3. 对图 5-6 中的每个电路，把电路图画完整，把电阻器都并联在 A 点和 B 点之间。

4. 把图5-6中每一组并联电阻器再彼此并联起来。

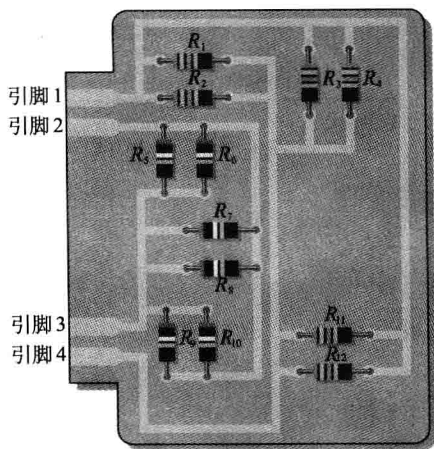


图5-5　例5-2图

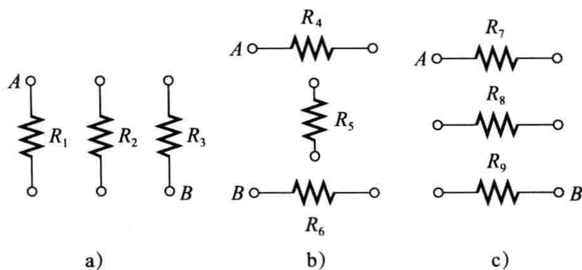


图5-6　测试题3、测试题4图

5.2　并联总电阻

电阻器并联时，总的电阻值减小，并联电路的总电阻总是小于最小电阻器的阻值。例如，如果10Ω电阻器与100Ω电阻器并联，总电阻小于10Ω。

学习完本节内容，应该能够

- 确定并联总电阻；
- 解释为什么电阻器并联时电阻减小；
- 应用并联电阻公式；
- 描述并联电路的两个应用。

当电阻器并联时，电流中有一条以上的路径，电流路径的数目等于并联支路的数目。

在图5-7a中只有一条电流路径，因为这是一个串联电路，有一定量的电流 I_1 通过 R_1。如果将电阻器 R_2 与 R_1 并联连接，如图5-7b所示，则有一另外的电流 I_2 通过 R_2，由于增加了并联

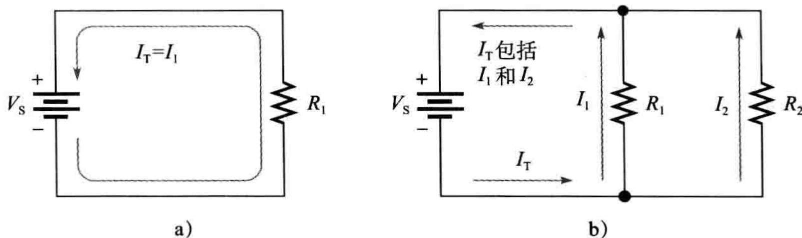


图5-7　电阻器并联减少总电阻，增大总电流

支路，使得从电源出来的总电流增大。假设电源电压是恒定的，从电源出来的总电流增加意味着总电阻下降，根据欧姆定律，增加并联电阻器，将进一步降低电阻值，增大总电流。

5.2.1　并联总电阻 R_T 的计算公式

图5-8电路显示了 n 个（n 可以是任何大于1的整数）电阻器并联的一般情况。随着并联电阻器的增加，将添加更多的电流路径，因此，电路的电导增大。回想一下2.5节定义的作为电阻倒数（$1/R$）的电导（G），它的单位是西门子（S）。

可简单地把并联电阻器当做导电通路，每个电阻器按下式添加到总电导：

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n$$

用 $1/R$ 替换 G，

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

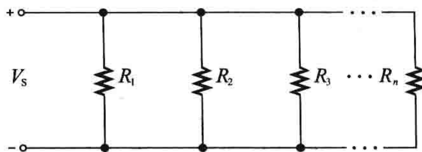


图 5-8 n 个电阻器并联的电路

等式两边取倒数，可得到 R_T：

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots + \frac{1}{R_n}} \tag{5-1}$$

公式（5-1）表明，将所有电阻倒数 $1/R$（或电导 G）相加，然后对和取倒数即得到并联的总电阻。

$$R_T = \frac{1}{G_T}$$

【例 5-3】 试计算图 5-9 所示的电路中 A 点和 B 点之间的并联总电阻。

解： 已知各个电阻时采用式（5-1）计算总电阻，首先求各个电阻的电导。

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{100\Omega} = 10\text{mS}$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{47\Omega} = 21.3\text{mS}$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{22\Omega} = 45.5\text{mS}$$

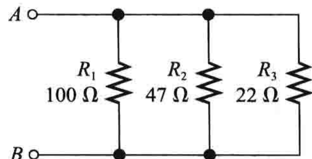


图 5-9 例 5-3 图

然后，把 G_1，G_2，G_3 相加再求倒数。

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{G_1 + G_2 + G_3}$$

$$= \frac{1}{10\text{mS} + 21.3\text{mS} + 45.5\text{mS}} = \frac{1}{76.8\text{mS}} = 13.0\Omega$$

可以作一个粗略的正确性检查，注意 R_T 的值（13.0Ω）确实小于最小的并联电阻值 R_3（22Ω）。

相关问题：如果在图 5-9 中再并联 33Ω 的电阻器，则 R_T 为多大？

计算器操作提示 并联电阻公式在计算器上用等式（5-1）很容易解决，一般过程是输入 R_1 值；接着按倒数 x^{-1} 键（x^{-1} 是某些计算器的一个辅助功能），符号 x^{-1} 是指 $1/x$，有些计算器使用 $1/x$ 而不是 x^{-1}；然后按+键，输入 R_2 的值，再取它的倒数；重复此步骤，直到添加完所有电阻值的倒数；最后一步，按 x^{-1} 键将 $1/R_T$ 转换为 R_T。此时，在显示器上显示的是总并联电阻值。根据计算器的不同，显示格式可能会有所不同。

【例 5-4】 展示用典型计算器解例 5-3 的步骤。

解： 1）输入 100，显示为 100；

2）按 x^{-1} 键（或先按 2nd 键，然后再按 x^{-1} 键）；

3）按+键；

4）输入 47；

5）按 x^{-1} 键；

6）按+键；

7）输入 22；

8）按 x^{-1} 键；

9）按 ENTER 键，显示为 76.7311411992E^{-3}；

10）按 x^{-1} 键，再按 ENTER 键，显示为 13.0325182758E^{0}。

在步骤10）显示的即为并联总电阻值，四舍五入为 13.0Ω。

相关问题：展示在图5-9中再并联连接33Ω电阻器后计算 R_T 所附加的计算器步骤。

两个电阻器并联的情况 式（5-1）是计算任意个电阻器并联总电阻的一般公式，由于实践中经常碰到两个电阻器并联的情况，因此，考虑两个电阻器并联的计算非常有用。

根据式（5-1），两个电阻器并联的公式是

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{5-2}$$

公式（5-2）表明：**两个电阻器的并联总电阻等于两个电阻的乘积除以两个电阻的和。**该式有时简称为“积除以和”公式。

【例5-5】 计算图5-10所示电路中接到电压源的总电阻。

解：利用公式（5-2）

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{680\Omega \times 330\Omega}{680\Omega + 330\Omega} = \frac{224\,000\Omega^2}{1010\Omega} = 222\Omega$$

相关问题：如果图5-10中用220Ω电阻替换 R_1，求 R_T。

等值电阻器并联的情况 并联电路的另一个特殊情况是所有并联的电阻器具有相同的电阻值，下式是这种情况下计算 R_T 的简便方法：

$$R_T = \frac{R}{n} \tag{5-3}$$

式（5-3）表明，任意个（n）具有相同电阻值（R）的电阻器并联时，总电阻 R_T 等于单个电阻值除以并联电阻器的个数。

【例5-6】 计算图5-11中 A、B 之间的总电阻。

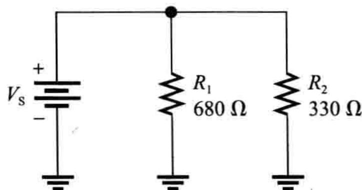


图5-10 例5-5图

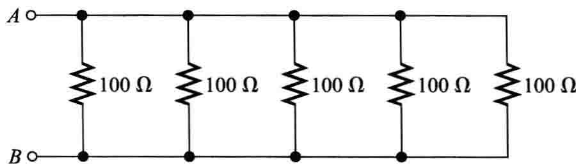


图5-11 例5-6图

解：共有5个100Ω电阻器并联，利用公式（5-3），

$$R_T = \frac{R}{n} = \frac{100\Omega}{5} = 20\Omega$$

相关问题：计算3个100kΩ电阻器并联的 R_T。

并联电阻表示法 有时候为了简便起见，用两个平行的竖线表示电阻器并联。例如，R_1 和 R_2 并联写成 $R_1 \parallel R_2$，同样，多个电阻器并联时，也可用这个方法表示。如

$$R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \parallel R_5$$

表示 R_1 到 R_5 的并联。

这一表示法还可用于电阻值。例如

$$10\text{k}\Omega \parallel 5\text{k}\Omega$$

意为10kΩ电阻器与5kΩ电阻器并联。

5.2.2 并联电路的应用

汽车 并联电路与串联电路相比的一个优点是当某一支路断开时其他支路不会受到影响。例如，如图5-12所示的汽车照明系统简化框图，当汽车的一个大灯坏了，不会导致其他灯出现故障，因为它们都是并联的。

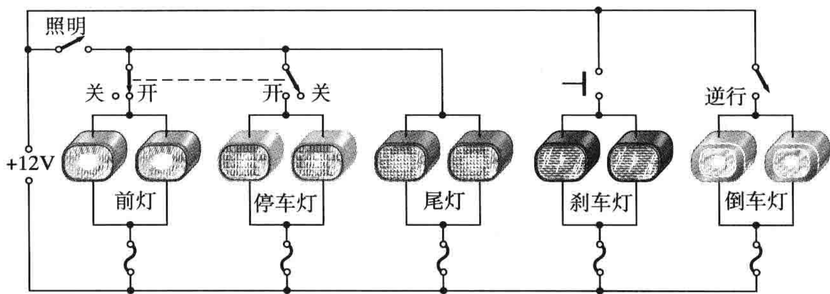


图5-12 汽车外部照明系统简化框图

请注意，刹车灯的开关独立于前灯和尾灯，只有当司机踩下制动踏板时刹车灯开关才闭合。当照明开关闭合时，两个前灯和两个尾灯亮，前灯亮时停车灯灭，反之亦然，如图所示由虚线连接的两个开关联动。如果任一灯烧坏（开路），其他的灯仍然有电流。当逆行齿轮啮合时，倒车灯接通。

并联电阻的另一个汽车应用是后窗除霜器。我们知道，电阻以发热的形式消耗功率，除霜器由一组并联的电阻丝组成，接通电源后加热玻璃。典型的除霜器可在窗上消耗超过100W的功率。虽然电阻加热没有其他形式加热效率高，但是，在类似应用中，却是最简单且成本效益最好的。

住宅 并联电路的另一个常见用途是住宅的电气系统。家里所有的灯和电器都是并联的。图5-13显示了一个典型的室内布线，有两个开关控制的灯和3个并联的壁装电源插座。

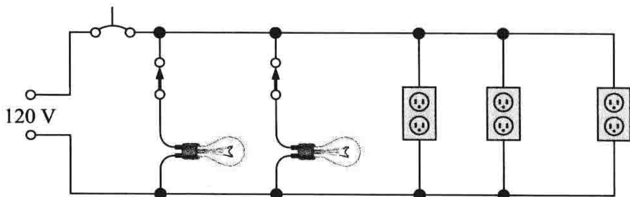


图5-13 住宅布线中并联电路举例

控制电路 许多控制系统使用并联电路或等效电路进行工业生产过程的控制和监控，例如生产线。复杂的控制应用在称为可编程序逻辑控制器（PLC）的专用计算机上实现。PLC显示了等效的并联电路，并在计算机屏幕上显示出来，虽然在内部电路可能仅作为一种计算机编程语言编写的代码存在，然而，所显示的电路原则上可以用硬件构成。这些电路可以画成类似梯形的结构，梯子的横档表示负载（和电源），导轨代表连接电压源的两个导体。（例如，注意图5-13的类似梯子，其一侧是灯和墙上的插座负载）。并联控制电路使用梯形图，但增加一些附加的控制元件（开关、继电器、定时器等）。增加控制元件后，结果创建了一个逻辑图，称为梯形逻辑。因为梯形逻辑很容易理解，所以在工业环境中非常流行，如工厂或食品加工的控制逻辑。本书写成梯形逻辑，但阶梯图（并联电路）却是所有梯形逻辑的核心。最重要的方面是梯形逻辑以易于阅读的格式显示了电路的基本功能。

本节测试题

1. 伴随着更多电阻器并联，总电阻是增大还是减小？
2. 总的并联电阻值总是小于什么值？
3. 对于图 5-14 所示的电路，确定 R_T（引脚 1 和引脚 4 之间）。图中电阻色环的颜色分别为红、红、红、金。注意，引脚 1 和引脚 2 相连，引脚 3 和引脚 4 相连。

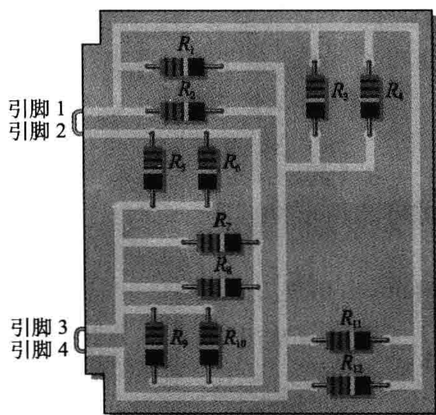


图 5-14　测试题 3 图

5.3　并联电路中的电压

任何给定的并联电路支路两端的电压等于并联的其他每条支路两端的电压。我们知道，并联电路中的每个电流路径称为一条支路。

学习完本节内容，应该能够

- 确定并联电路中每条支路的电压；
- 解释为什么并联电阻的电压都是相同的。

为了说明并联电路中的电压，我们来看图 5-15a，A、B、C 和 D 点是沿并联电路左侧电气上相同的点，因为沿着这条线的电压是相同的，可以把这些点视为由一条连线接到电池的负极端。沿电路右侧的点 E、F、G 和 H 与电压源正极端等电压。因此，每一个并联电阻器两端的电压是相同的，且等于电源电压。注意，图 5-15 中的并联电路类似于前面所描述的梯形。

图 5-15b 与图 5-15a 是同一个电路，只是用稍微不同的方式绘制。其中，每个电阻器的左侧接到同一个点——电池的负极端，而每个电阻器的右侧也接到同一个点——电池的正极端。所有电阻器仍然并联接在电源两端。

在图 5-16 中，12V 电池接 3 个并联电阻器。测量电池两端的电压，然后测量每个电阻器的电压，它们的读数是相同的。我们看到，并联电路中每条支路都呈现相同的电压。

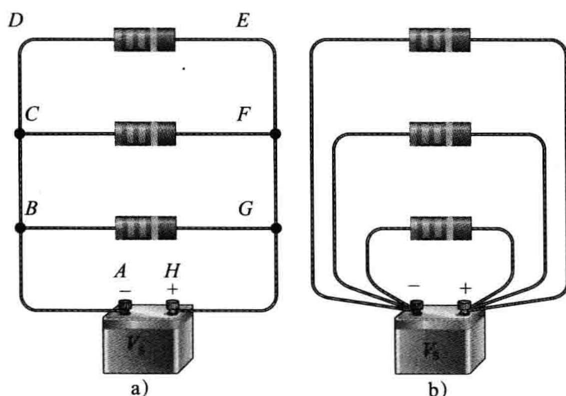


图 5-15　并联支路两端的电压相同

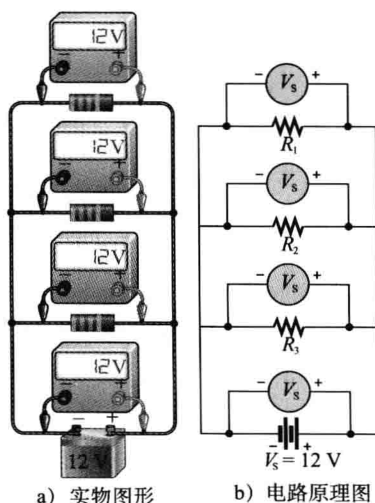


图 5-16　每一并联电阻器两端呈现相同电压

【例 5-7】

试确定图 5-17 中每个电阻器两端的电压。

解： 5 个电阻器并联连接，所以每个电阻器的电压都等于电源电压 V_S，熔丝（保险丝）两端没有电压。

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = V_5 = 25\text{V}$$

相关问题：如果将 R_4 从电路中去掉，试问 R_3 两端的电压是多少？

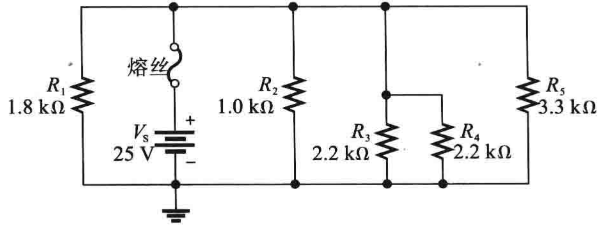


图 5-17　例 5-7 图

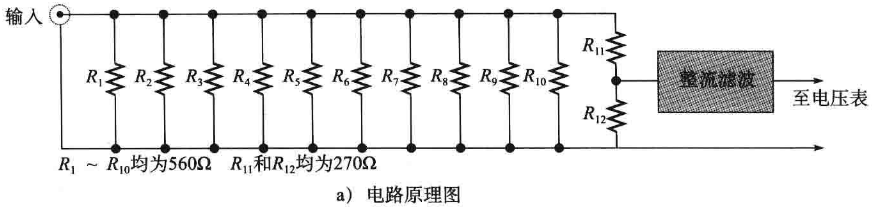
Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E05-07，验证每个电阻器的电压都等于电源电压。对相关问题重复上述过程。

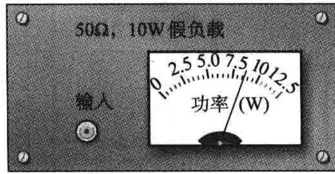
系统举例 5-1　假负载与负载库

假负载是一种精密的高功率电阻器，在一个机箱中可包括多个电阻器。假负载用于系统测试，例如不带实际负载（天线）的无线电发射机。负载库执行同样的电气功能，但它吸取一定量的电流，代表一个特定的电阻。假负载和负载库都从系统中吸收能量。对于无线电发射机，发射机输出的能量通常被送往天线系统形成电磁能量，而不是送到假负载以热的形式消耗，如果没有天线或假负载，发射机可能会损坏。假负载使得发射机能在模拟条件下进行测试，使调试过程不对其他系统产生干扰。除了无线电发射机测试，假负载还可用于其他系统的测试，例如，假负载可用于称重传感器的校准测试。

图 5-18a 显示了一假负载电路原理图，用于测试小型无线电发射机，由 1W 电阻器（R_{11} 和 R_{12} 均为 0.5W）组成。电阻 R_{11} 和 R_{12} 构成一个分压器与阵列中的其他电阻并联。分压器输出经过整流，并用电压表测量，用于功率校准。为了与 50Ω 天线系统匹配，测量过程中电路的总电阻必须保持 50Ω。整个组件要求安装在一个屏蔽罩内，以避免电磁能量辐射。屏蔽罩内包含一块电表用于读取负载的功率，如图 5-18b 所示。



a）电路原理图



b）假负载前面板

图 5-18　用于小型发射机测试的假负载

本节测试题

1. 100Ω 和 220Ω 电阻并联接到 5V 电源，试问每个电阻的电压是多少？

2. 图 5-19 中接在电阻 R_1 两端的电压表测得电压为 118V，如果将电压表移到 R_2 两

端，则测量显示的电压应为多少？电源电压为多大？

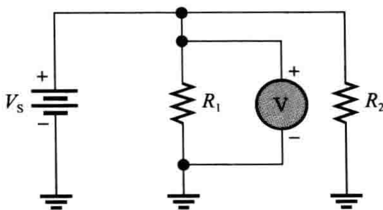


图 5-19 测试题 2 图

3. 在图 5-20 中，电压表 1 指示值为多大？电压表 2 呢？

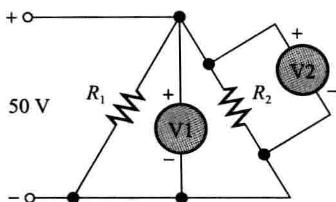


图 5-20 测试题 3 图

4. 试问并联电路的每条支路的电压相互关系如何？

5.4 欧姆定律的应用

欧姆定律可以用于并联电路分析。

学习完本节内容，应该能够

- 将欧姆定律用于并联电路；
- 求并联电路的总电流；
- 求并联电路的支路电流、电压和电阻。

下列例子演示如何在并联电路中应用欧姆定律。

【例 5-8】 求图 5-21 中电池流出的总电流。

解： 电池"看到"的总电阻决定电流大小，首先计算 R_T。

$$R_T = \frac{R_1R_2}{R_1+R_2} = \frac{100\Omega\times56\Omega}{100\Omega+56\Omega} = \frac{5600\Omega^2}{156\Omega} = 35.9\Omega$$

电池电压为 10V，应用欧姆定律求 I_T。

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{10V}{35.9\Omega} = 279mA$$

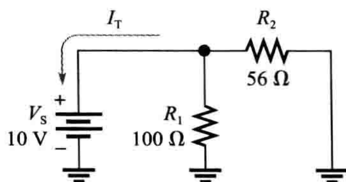


图 5-21 例 5-8 图

相关问题：求图 5-21 中流过 R_1 和 R_2 的电流，证明流过 R_1、R_2 的电流之和等于总电流。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E05-08，使用万用表验证总电流和支路电流的计算值。

【例 5-9】 确定流过图 5-22 所示电路中每个并联电阻的电流。

解： 每个并联电阻（支路）的电压都等于电源电压，即 R_1 两端电压为 20V，R_2 两端电压为 20V，R_3 两端电压为 20V。计算各个电阻的电流如下：

$$I_1 = \frac{V_S}{R_1} = \frac{20V}{1.0k\Omega} = 20.0mA$$

$$I_2 = \frac{V_S}{R_2} = \frac{20V}{2.2k\Omega} = 9.09mA$$

$$I_3 = \frac{V_S}{R_3} = \frac{20V}{560\Omega} = 35.7mA$$

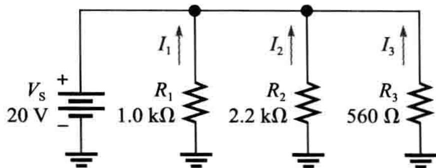


图 5-22 例 5-9 图

相关问题：如果在图 5-22 所示的电路中添加一个 910Ω 的并联电阻，试确定所有支路电流。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E05-09，测量每个电阻的电流；将 910Ω 电阻与其他电阻并联，测量各支路电流。当新电阻接入后，电源总电流变化了多少？

【例 5-10】 求图 5-23 所示并联电路两端的电压。

解： 流入并联电路的总电流为 37mA，如果已知总电流，应用欧姆定律即可得到电压。总电阻为

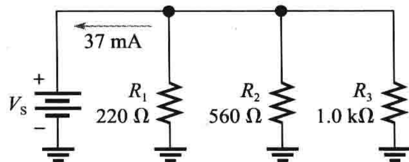


图 5-23 例 5-10 图

$$R_T=\frac{1}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3}}=\frac{1}{\dfrac{1}{220\Omega}+\dfrac{1}{560\Omega}+\dfrac{1}{1.0\text{k}\Omega}}$$

$$=\frac{1}{4.55\text{mS}+1.79\text{mS}+1\text{mS}}=\frac{1}{7.34\text{mS}}=136\Omega$$

因此，电源电压和每个支路电压为

$$V_S=I_TR_T=37\text{mA}\times136\Omega=5.05\text{V}$$

相关问题：假设 V_S 保持不变，如果在图 5-23 中 R_3 断开，求总电流。

【例 5-11】 有时直接测量电阻是不实际的，例如，钨丝灯泡接通变热后其电阻将增大，而欧姆表只能测量在冷却状态的灯丝电阻。假设想知道汽车两个前灯灯泡和尾灯灯泡的等效热电阻，汽车两个前灯的正常工作电压为 12.6 V，每个灯亮时的电流都为 2.8 A。

(a) 当两个前灯都亮时等效的总热电阻是多大？

(b) 假设当 4 个灯都亮时，前灯和尾灯总电流为 8.0A，那么每个尾灯的等效电阻多大？

解： (a) 应用欧姆定律计算一个前灯的等效电阻。

$$R_{前}=\frac{V}{I}=\frac{12.6\text{V}}{2.8\text{A}}=4.5\Omega$$

由于两个灯泡并联且电阻相等，因此

$$R_{T(前)}=\frac{R_{前}}{n}=\frac{4.5\Omega}{2}=2.25\Omega$$

(b) 应用欧姆定律求两个尾灯与两个前灯都亮时的总电阻。

$$R_{T(前+尾)}=\frac{12.6\text{V}}{8.0\text{A}}=1.58\Omega$$

应用并联电阻公式求两个尾灯总电阻

$$\frac{1}{R_{T(前+尾)}}=\frac{1}{R_{T(前)}}+\frac{1}{R_{T(尾)}}$$

$$\frac{1}{R_{T(尾)}}=\frac{1}{R_{T(前+尾)}}-\frac{1}{R_{T(前)}}=\frac{1}{1.58\Omega}-\frac{1}{2.25\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{T(尾)}}=5.25\Omega$$

由于两个尾灯并联，因此每个尾灯的电阻为

$$R_{尾}=nR_{T(尾)}=2\times5.25\Omega=10.5\ \Omega$$

相关问题：若每个前灯吸取的电流为 3.15A，则两个前灯的总等效电阻为多少？

本节测试题

1. 3 个 680Ω 电阻并联接到 12V 电池，试问电池的总电流为多大？
2. 图 5-24 所示的电路中若要产生 20mA 电流，需要多大的电压？

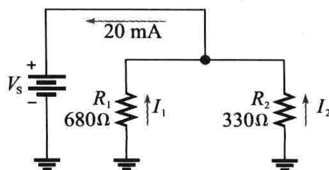


图5-24 测试题 2、测试题 3 图

3. 试问图 5-24 所示的电路中每个电阻的电流是多少？
4. 4 个等值电阻器并联接到 12V 电源上，电源输出电流为 6mA，试问每个电阻器的阻值是多少？
5. 设 1.0kΩ 电阻和 2.2kΩ 电阻并联，并联电路总电流为 100mA，试问电阻两端的电压降是多少？

5.5 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电压定律研究单个闭合路径的电压，而基尔霍夫电流定律则运用于多个路径的电流。

学习完本节内容，应该能够

- 运用基尔霍夫电流定律；
- 表述基尔霍夫电流定律；
- 定义节点；
- 通过支路电流叠加确定总电流；
- 确定未知支路的电流。

基尔霍夫电流定律简记为 KCL：**流入某一节点的电流之和（总的流入电流）等于流出该节点的电流之和（总的流出电流）。**

节点是电路中两个或两个以上元件连接的点。在并联电路中，节点就是并联支路汇集到一起的点。例如，图 5-25 所示的电路中存在两个节点，标记为节点 A 和节点 B，我们顺着电流从电源的负极端开始，从电源流入节点 A 的总电流为 I_T，在这个节点电流如图中标记分成 3 条支路，这 3 条支路的电流（I_1、I_2和 I_3）均流出节点 A。基尔霍夫电流定律指出，流入节点 A 的总电流等于流出节点 A 的总电流，即

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

现在，顺着图 5-25 电路的 3 条支路电流可以看到，它们全部流回到节点 B，电流 I_1、I_2和 I_3均流入节点 B，而电流 I_T流出节点 B。因此，基尔霍夫电流定律在节点 B 的公式与节点 A 相同。

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_T$$

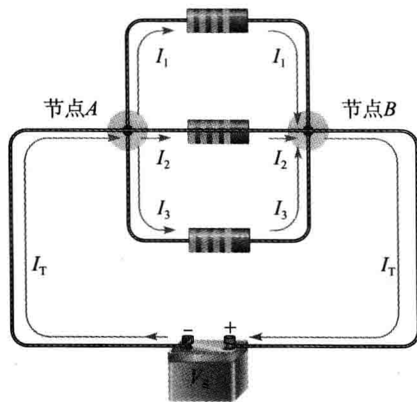


图 5-25 基尔霍夫电流定律：流入节点的电流等于流出节点的电流

系统注释

基尔霍夫电流定律可应用于任意电气系统负载情况。例如，电源连接到电路板，则流进电路板的电流等于流出电路板的电流。同样地，建筑物供电的相线流入的电流等于从中性线流出的电流，供给的电流和返回的电流总是相同的，但系统出现故障时可能会导致电流从中性线以外的一个不同路径返回（称为"接地故障"）。

根据基尔霍夫电流定律，流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和，图 5-26 显示了基尔霍夫电流定律的一般情况，可写成下面的数学关系式。

$$I_{IN(1)} + I_{IN(2)} + I_{IN(3)} + \cdots + I_{IN(n)} = I_{OUT(1)} + I_{OUT(2)} + I_{OUT(3)} + \cdots + I_{OUT(m)} \tag{5-4}$$

将方程右边的项移到左边并改变符号，得到下面的等价式子：

$$I_{IN(1)}+I_{IN(2)}+I_{IN(3)}+\cdots+I_{IN(n)}-I_{OUT(1)}-I_{OUT(2)}-I_{OUT(3)}-\cdots-I_{OUT(m)}=0$$

这个式子表明节点的流入流出电流总和为零，这相当于计算所有流入和流出节点电流时的“收支平衡”。

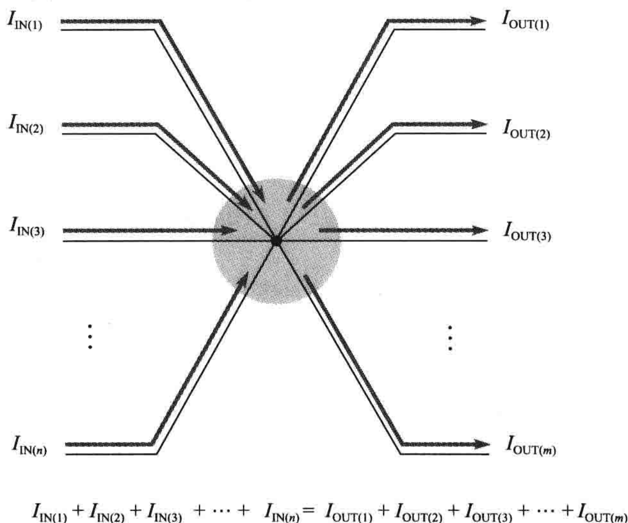


图 5-26 一般化电路节点演示基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律的一个等价写法是像4.6节基尔霍夫电压定律那样用数学求和简记。为了用这种方法表示基尔霍夫电流定律，我们对电流顺序分配下标（1，2，3，等等），不管电流是流入或是流出节点。

规定流入节点的电流为正号，流出节点的电流为负号。按此符号，基尔霍夫电流定律可表述如下：

$$\sum_{i=1}^{n} I_i = 0$$

该式使用了数学求和符号Σ，表示从 $i=1$ 至 $i=n$ 的各项带符号相加并置零。可用文字表述为：流入和流出任一节点的所有电流的代数和等于零。

可以通过连接电路并测量各支路电流与电源总电流来验证基尔霍夫电流定律，如图5-27所示。当支路电流加在一起时，其总和等于总电流。本规则适用于任意数量的支路。

【例5-12】 在例5-11中求得了汽车前灯和尾灯的等效电阻，给定总电流为8.0A且前灯电流为5.6A，试利用基尔霍夫电流定律求每个尾灯的电流。假设电池的负载只有车灯。

解： 电池流出的电流等于车灯的电流。

$$I_{电池}=I_{T(前)}+I_{T(尾)}$$

电池流出的总电流为8.0A，流向灯泡的电流为负，整理得到

$$I_{T(尾)}=I_{电池}-I_{T(前)}=8.0\text{A}-5.6\text{A}=2.4\text{A}$$

由于两个尾灯是相同的，所以每个尾灯的电流为2.4A/2=1.2A。

相关问题：利用例5-11求得的尾灯电阻，证明欧姆定律给出相同的结果。

【例5-13】 在图5-28所示的电路中已知支路电流，确定流入节点 A 的总电流和流出节点 B 的总电流。

解： 流出节点 A 的总电流是两条支路电流之和，因此，流入节点 A 的总电流为

$$I_T=I_1+I_2=5\text{mA}+12\text{mA}=17\text{mA}$$

流入节点 B 的总电流是两条支路电流之和，因此，流出节点 B 的总电流为

$$I_T=I_1+I_2=5\text{mA}+12\text{mA}=17\text{mA}$$

相关问题：如果有第三个电阻并联接到图5-28所示的电路中，而且电流为3mA，则流入节点 A 的总电流和流出节点 B 的总电流是多少？

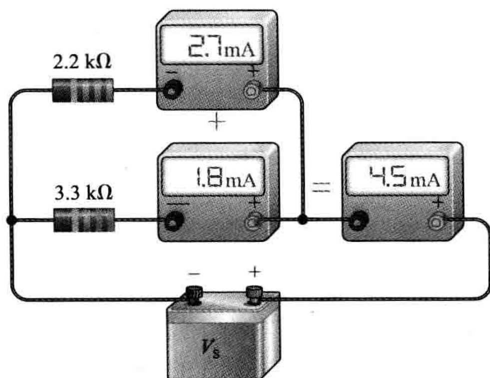


图 5-27　基尔霍夫电流定律演示

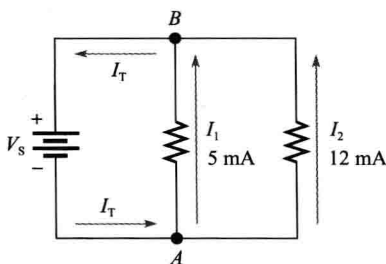


图 5-28　例 5-13 图

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E05-13，验证总电流就是各支路电流之和。对相关问题重复验证。

【例 5-14】　确定图 5-29 中流过 R_2 的电流。

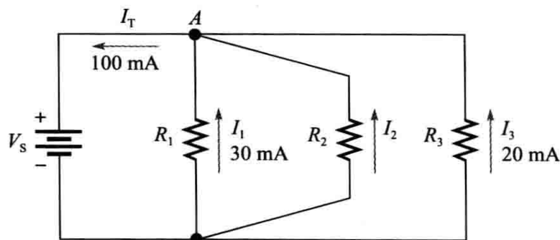


图 5-29　例 5-14 图

解：流出节点 A 的总电流是 $I_T = I_1 + I_2 + I_3$，从图 5-29 中已知总电流和流过 R_1 和 R_3 的电流，解 I_2。

$$I_2 = I_T - I_1 - I_3$$
$$=100\text{mA}-30\text{mA}-20\text{mA}=50\text{mA}$$

相关问题：如果有第四条电流为 12mA 的支路加到图 5-29 所示的电路中，试确定 I_T 和 I_2。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E05-14，验证 I_2 的计算值。对相关问题重复验证。

【例 5-15】　用基尔霍夫电流定律求图 5-30 中由电流表 A3 和 A5 测量的电流。

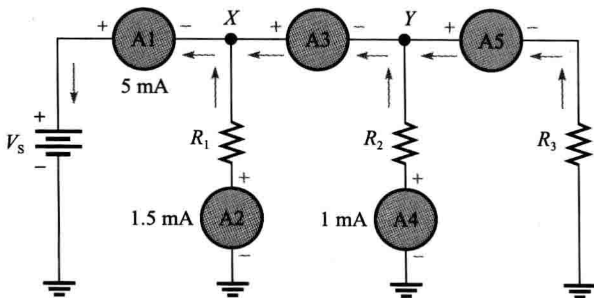


图 5-30　例 5-15 图

解：流出节点 X 的总电流是 5mA，流入节点 X 有两个电流：流过 R_1 的 1.5mA 和流过 A3 的电流。节点 X 的基尔霍夫电流定律是

$$5\text{mA}=1.5\text{mA}+I_{A3}$$

解方程得

$$I_{A3} = 5\text{mA} - 1.5\text{mA} = 3.5\text{mA}$$

流出节点 Y 的总电流是 $I_{A3}=3.5\text{mA}$，流入节点 Y 有两个电流：流过 R_2 的 1mA 和流过 A5 和 R_3 的电流。在节点 Y 应用基尔霍夫电流定律得

$$3.5\text{mA}=1\text{mA}+I_{A5}$$

解方程得

$$I_{A5} = 3.5\text{mA} - 1\text{mA} = 2.5\text{mA}$$

相关问题：在图 5-30 中，如果在 R_3 右下方放置一个电流表，则它测量的电流将是多大？

如果把电流表放在电池负极下面，测量的电流又将是多大？

本节测试题

1. 试用两种方式表述基尔霍夫电流定律。
2. 流入节点的总电流为 2.5A，流出节点的电流分成3条并行支路，试问3条支路电流之和为多少？
3. 在图 5-31 中，100mA 和 300mA 流入节点，那么流出节点的电流为多少？

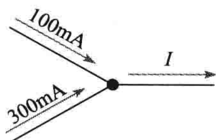


图 5-31 测试题 3 图

4. 拖车上的两个尾灯分别吸取 1A 电流，两个刹车灯每个吸取 1A 电流，试问所有灯都亮时，该拖车接地线的电流是多少？
5. 某地下泵站有 10A 的相线电流，试问中性线的电流应该是多少？

5.6 分流器

由于电流进入并联支路连接点后被分成若干条分支电流，因此并联电路可以用做分流器。学习完本节内容，应该能够

- 使用并联电路作分流器；
- 应用分流器公式；
- 确定未知支路的电流。

在并联电路中，流入并联支路连接点（节点）的总电流被分配给各条并联支路，因此，并联电路具有分流器作用。两条并联支路情况的电流分配原则如图 5-32 所示，其中，总电流 I_T 分配给 R_1 和 R_2 两条通路。

并联电路中，每个并联电阻器两端的电压都相同，因而支路的电流与电阻值成反比，例如，如果 R_2 的值是 R_1 的两倍，那么 I_2 的值只有 I_1 的 1/2。换句话说，总电流在并联电阻器之间分配，分电流值与电阻值成反比。

按照欧姆定律，具有高电阻值的支路分电流小，而电阻值低的支路分电流大。如果所有支路的电阻相同，则支路的电流也相同。

系统注释 TO 外壳功率电阻器

在某些大电流（约达 40A）系统中，分流电阻器的阻值常常很小，许多情况下大额定功率低阻值电阻器设计成可安装散热器的形式，这种电阻器称为 TO 外壳[⊖]，在 TO 外壳中能有小到 5mΩ、1%容差的电阻器。

TO 外壳允许通过安装散热器来散热，而不用在敏感的电子组件上散热。根据散热设计，散热器的功率规格从 1W 到 100W。使用 TO 外壳电阻器的优点是可以工作在高速开关电路或高频电路中，因为它们对信号的影响很小。

图 5-33 给出了特殊值来演示如何按照支路电阻进行电流分配。注意，这时上面支路电阻是下面支路电阻的 1/10，而上面支路的电流却是下面支路电流的十倍。

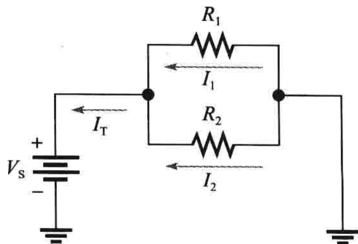


图 5-32 并联支路的电流分配

⊖ TO 外壳用单边引脚封装。——译者注

分流公式

如图 5-34 所示，我们能够推导出任意个电阻器并联时确定电流分配的公式，图中 n 表示电阻器总数。

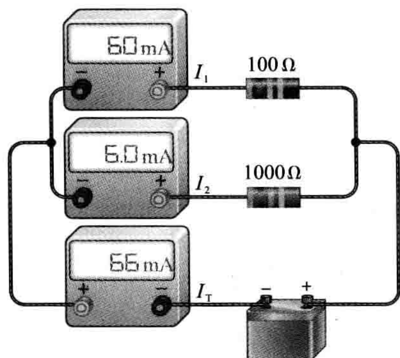


图 5-33 具有最小电阻的支路电流最大，而具有最大电阻的支路电流最小

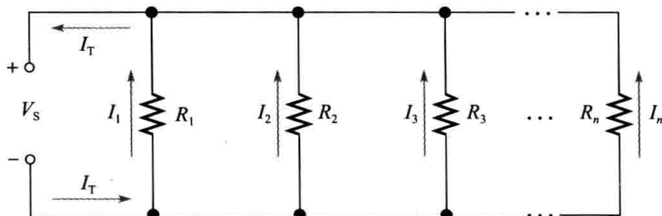


图 5-34 n 条支路的并联电路

设流过任一并联电阻的电流为 I_x，此处 x 表示并联电阻器的编号（1、2、3 等），根据欧姆定律，图 5-34 中任一电阻器中电流计算如下：

$$I_x = \frac{V_S}{R_x}$$

式中，电源电压 V_S加在每个并联电阻器两端，R_x表示任一电阻器的阻值。总电源电压 V_S等于总电流乘以总并联电阻。

$$V_S = I_T R_T$$

在 I_x表达式中用 $I_T R_T$替换 V_S，得到

$$I_x = \frac{I_T R_T}{R_x}$$

整理可得

$$I_x = \left(\frac{R_T}{R_x}\right) I_T \tag{5-5}$$

式中，x=1、2、3 等，等式（5-5）是一般电流的分配公式，可用于含任意条支路的并联电路。

流过任一支路的电流（I_x）等于总并联电阻（R_T）除以这条支路电阻值（R_x），再乘以流入并联支路连接点的总电流（I_T）。

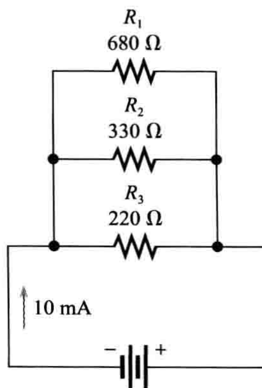


图 5-35 例 5-16 图

【例 5-16】 试确定图 5-35 所示的电路中流过每个电阻的电流。

解： 首先计算总并联电阻。

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{680\Omega} + \frac{1}{330\Omega} + \frac{1}{220\Omega}} = 111\Omega$$

总电流是 10mA，利用等式（5-5）计算各支路电流。

$$I_1 = \left(\frac{R_T}{R_1}\right) I_T = \frac{111\Omega}{680\Omega} \times 10\text{mA} = 1.63\text{mA}$$

$$I_2 = \left(\frac{R_T}{R_2}\right) I_T = \frac{111\Omega}{330\Omega} \times 10\text{mA} = 3.36\text{mA}$$

$$I_3 = \left(\frac{R_T}{R_3}\right)I_T = \frac{111\Omega}{220\Omega}\times 10\text{mA} = 5.05\text{mA}$$

相关问题：在图5-35中，假设电源电压保持不变，如果去掉R_3，试确定流过R_1和R_2的电流。

两条支路的分流公式 当我们已知电压和电阻时，利用欧姆定律（$I=V/R$）可以确定并联电路任意支路的电流。当电压未知而总电流已知时，可以利用下面的式子计算支路电流：

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)I_T \tag{5-6}$$

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)I_T \tag{5-7}$$

这两个式子表明，一条支路的电流等于另一条支路的电阻除以两个电阻之和，然后再乘以总电流。

【例5-17】 求图5-36中的I_1和I_2。

解： 利用等式（5-6）确定I_1。

$$I_1 = \left(\frac{R_2}{R_1+R_1}\right)I_T = \frac{47\Omega}{147\Omega}\times 100\text{mA} = 32.0\text{mA}$$

利用公式（5-7）确定I_2。

$$I_2 = \left(\frac{R_1}{R_1+R_1}\right)I_T = \frac{100\Omega}{147\Omega}\times 100\text{mA} = 68.0\text{mA}$$

相关问题：在图5-36中，如果$R_1=56\Omega$、$R_2=82\Omega$，I_T保持不变，试问各支路电流是多少？

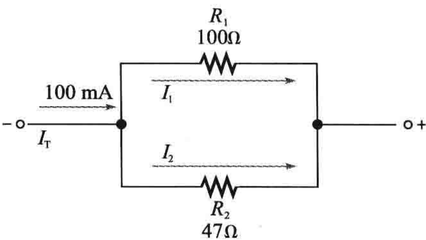


图5-36 例5-17图

系统举例5-2 电流表分流器

许多系统包括基本的模拟电流表，它们内置在控制面板上，可以提供电流的直观指示。多数电流表设置成可以读取多个量程。通常情况下，电表是很敏感的，通过大电流将烧毁表头。为了避免出现这种情况而又能读取更大的电流，需要接入称为分流器的并联电阻，使大部分电流从分流器流过而不经过电表。

模拟式电流表中导致指针偏转正比于电流的机制称为表机芯（又称表头），表头具有一定的电阻且有一最大电流值，这个最大电流称为全刻度偏转电流，使指针走满量程偏转到刻度的最右边。本例中，电表内阻为50Ω，最大偏转电流为1mA，用这个表头做的基本电流表只能测量1mA以下的电流，如果表头电流大于1mA，指针将“夹在”（或停在）满刻度处，可能导致感应表头的损坏。

利用并联电阻可以扩展电流表的测量范围，应用分流规则或欧姆定律可以确定并联电阻的阻值。图5-37显示了50Ω、1mA表头的三个量程：1mA、10mA和100mA。在1mA量程挡，没有分流电阻。而在10mA量程挡，分流电阻为表头电阻的1/9或5.56Ω。

表5-1列出了量程开关各挡对应的表头最大电流与最大分流电流。注意，最大表头电流绝

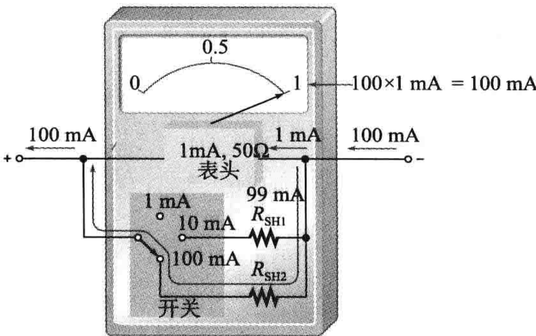


图5-37 三量程毫安表

表5-1 电表电流

量程挡	最大表头电流	最大分流器电流
1mA	1.0mA	0
10mA	1.0mA	9.0mA
100mA	1.0mA	99.0mA

不能超过其额定的 1.0mA，图 5-37 显示最大电流测量，此时有 99mA 电流通过分流器，而只有 1.0mA 电流流过表头。如果电表读数小于满刻度，则表头和分流器的电流都按比例减小。

本节测试题

1. 下列电阻器与电压源并联：220Ω、100Ω、68Ω、56Ω 和 22Ω，试问流过哪个电阻器的电流最大？流过哪个电阻器的电流最小？
2. 试确定图 5-38 中流过 R_3 的电流。

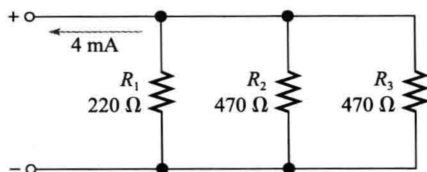


图 5-38 测试题 2 图

3. 求图 5-39 所示的电路中流过每个电阻的电流。

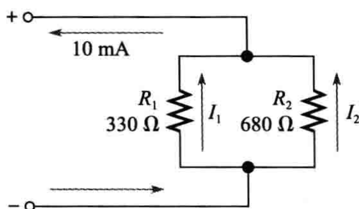


图 5-39 测试题 3 图

5.7 并联电路的功率

与串联电路相同，并联电路的总功率可通过各个电阻的功率相加得到。

学习完本节内容，应该能够

- 确定并联电路的功率。

式（5-8）给出了任意个电阻并联的总功率计算公式。

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots + P_n \tag{5-8}$$

式中，P_T为总功率，P_n为并联电路最后一个电阻的功率。我们知道，和串联电路一样功率是可加的。

把第 3 章关于功率的公式直接应用到并联电路上，得到下列计算总功率 P_T的公式：

$$P_T = V_S I_T$$

$$P_T = I_T^2 R_T$$

$$P_T = \frac{V_S^2}{R_T}$$

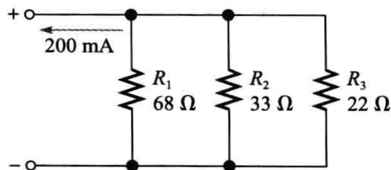


图 5-40 例 5-18 图

式中，V_S为并联电路两端的电压，I_T为流入并联电路的总电流，R_T为并联电路的总电阻。例 5-18 和例 5-19 说明了如何计算并联电路的总功率。

【例 5-18】 试确定图 5-40 所示并联电路的总功率。

解： 已知总电流为 200mA，总电阻为

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{68\Omega} + \frac{1}{33\Omega} + \frac{1}{22\Omega}} = 11.1\Omega$$

因为已知 I_T 和 R_T，所以最容易使用的公式是 $P_T = I_T^2 R_T$。因此，

$$P_T = I_T^2 R_T = (200\text{mA})^2 \times 11.1\Omega = 444\text{mW}$$

让我们演示一遍，如果确定了每个电阻的功率，然后加起来，将得到相同的结果。首先求出电路中每个并联支路的电压。

$$V_S = I_T R_T = 200\text{mA} \times 11.1\Omega = 2.22\text{V}$$

记住每个支路的电压都是相同的。

接下来，利用 $P=V_S^2/R$ 计算每个电阻的功率。

$$P_1=\frac{(2.22\text{V})^2}{68\Omega}=72.5\text{mW}$$

$$P_2=\frac{(2.22\text{V})^2}{33\Omega}=149\text{mW}$$

$$P_3=\frac{(2.22\text{V})^2}{22\Omega}=224\text{mW}$$

现在把三个功率加起来得到总功率。

$$P_T=72.5\text{mW}+149\text{mW}+224\text{mW}=446\text{mW}$$

计算证明，各个功率的和等于（近似）由功率公式确定的总功率，因计算过程舍入到三位有效数字而导致了结果的差异。

相关问题：如果总电压加倍，重新求图5-40的总功率。

【例5-19】 立体声系统中的一个通道放大器如图5-41所示，驱动两个并联的扬声器，如果输出到扬声器的最大电压[⊖]是15V，则放大器能够传输给扬声器多大功率？

解： 扬声器并联接在放大器输出端，所以，两个扬声器的电压相同。每个扬声器的最大功率是

$$P_{max}=\frac{V_{max}^2}{R}=\frac{(15\text{V})^2}{8\Omega}=28.1\text{W}$$

由于总功率是两个扬声器功率之和，因此，放大器必须能够提供给扬声器系统两倍的单个扬声器功率。

$$P_{T(max)}=P_{max}+P_{max}=2P_{max}=2\times28.1\text{W}=56.2\text{W}$$

相关问题：如果放大器能输出的最大电压为18V，则输出给扬声器的最大总功率是多少？

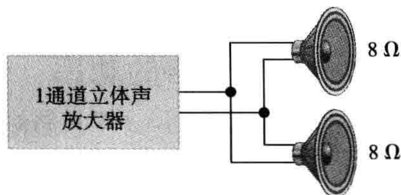


图5-41 例5-19图

本节测试题

1. 如果已知并联电路中每个电阻的功率，试问如何求总功率？
2. 并联电路的电阻器消耗如下功率：1W、2W、5W和8W，问电路的总功率是多少？
3. 电路有1.0kΩ、2.7kΩ和3.9kΩ三个电阻并联，流入并联节点的总电流为1mA，问电路的总功率是多少？
4. 通常情况，电路的保护用熔丝至少允许120%最大期望电流流过，假设电池电压为12.6V，汽车后窗除霜器的额定值为100W，试问应安装什么规格的熔丝？

5.8 故障排除

回顾前面介绍的内容，开路是一种电流路径断开的电路，其中没有电流。本节将看到并联支路开路对并联电路的影响。

学习完本节内容，应该能够

- 对并联电路进行故障排除；
- 在电路中检查开路。

⊖ 这里是交流电压，但是后面将会学习到，功率计算对交流电压和直流电压是相同的。

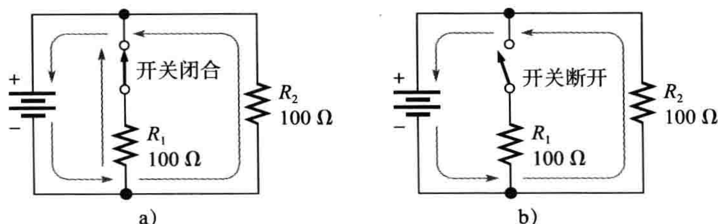


图 5-42　当开关断开时总电流减小而流过 R_2 的电流保持不变

5.8.1　开路支路

在一条并联支路上接一个开关，如图 5-42 所示，通过开关可以接通或断开这条支路。当开关闭合时，如图 5-42a 所示，R_1 和 R_2 并联，总电阻为 50Ω（两个 100Ω 电阻并联），电流流过两个电阻。如果开关断开，如图 5-42b 所示，R_1 从电路中移去，总电阻为 100Ω，尽管电源总电流减少了 R_1 中的电流，但是同样的电压加在 R_2 两端，R_2 流过同样的电流。一般地，当并联支路发生断路时，总电阻增大，总电流减小，而剩下的其他并联支路流过的电流不变。

考虑图 5-43 所示的电灯电路，有四盏灯并联接在 12V 电源上，图 5-43a 中每盏灯都有电流，现在假设有一盏灯泡烧坏，形成一条支路开路，如图 5-43b 所示，由于电流不能流过开路支路所以这盏灯不亮。然而，其他并联灯泡的电流照旧，仍然亮着。开路的支路不会改变剩下的并联支路的电压，电压仍然是 12V，因而，其他各支路电流也保持不变。

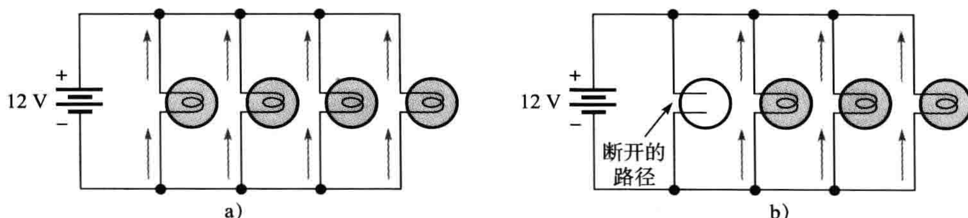


图 5-43　当一个灯泡开路时，总电流减少了开路灯泡的电流量，其他支路电流保持不变

可以看到，在照明系统中，并联电路比串联电路优越，因为如果一个或多个并联灯泡烧坏，其他灯将仍然可以继续工作，而在串联电路中，当一个灯泡熄灭时，所有其他的灯都将熄灭，因为电流路径被完全断开。

当并联电路中的一个电阻器断开时，开路的电阻不能通过测量支路电压来定位，因为所有并联支路存在相同的电压，因此，无法通过简单的电压测量断定电阻是否开路（半分法不适用），好的电阻总是和开路的电阻具有相同的电压，如图 5-44 所示（注意，中间电阻开路）。然而，带热成像相机的温度测量可以确定哪个电阻有电流（良好）或无电流（损坏）。

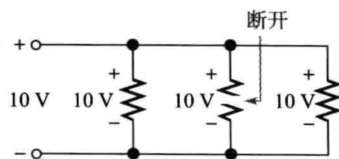


图 5-44　所有并联支路（无论开路或闭路）有同样的电压

如果目视检查无法确定开路的电阻，可以通过测量电阻值或电流值来定位。在实践中，测量电阻或电流比测量电压困难，因为测量电阻必须先断开电路，而测量电流则必须将电流表串联插入被测电路。因此，为了连接 DMM 测量电阻或电流，必须切断导线或断开印制电路，或将元件一端从电路板上剥离。测量电压时这个过程当然不需要，因为只要将电压表的表笔简单地跨接在元件两端就可以测量电压。

小贴士 另一种无需断开电路连接电流表测量电流的方法是：在原电路中每个需测量电流的线上串联一个1Ω电阻作为原来电路的一部分，这个小的“感应”电阻一般不会影响总电阻。通过测量感应电阻两端的电压，就能自动获得电流的读数，因为

$$I=\frac{V}{R}=\frac{V}{1\Omega}=V$$

5.8.2 通过测量电流发现开路支路

在怀疑有开路支路的并联电路中，测量总电流就可以发现开路。当有并联电阻器开路时，I_T总是低于其正常值。一旦已知I_T和支路两端的电压，若所有电阻器都具有不同的阻值时，简单计算就能确定开路的电阻器。

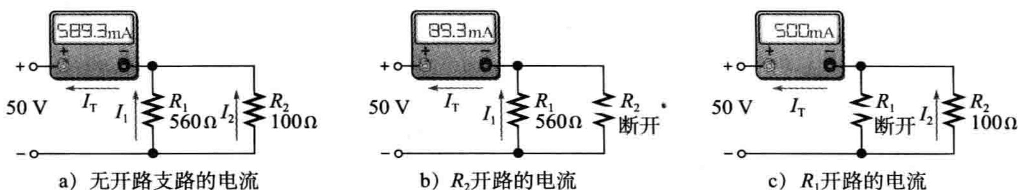
考虑图5-45a所示的两条支路并联的电路，如果一个电阻器开路，总电流将等于好的电阻器中的电流。欧姆定律告诉我们，每个电阻器的电流为

$$I_1=\frac{50\text{V}}{560\Omega}=89.3\text{mA}$$

$$I_2=\frac{50\text{V}}{100\Omega}=500\text{mA}$$

$$I_T=I_1+I_2=589.3\text{mA}$$

如果R_2开路，总电流将为89.3mA，如图5-45b所示。如果R_1开路，总电流将为500mA，如图5-45c所示。



a）无开路支路的电流　　b）R_2开路的电流　　c）R_1开路的电流

图5-45 通过测量电流发现开路支路

这个过程可以推广到任意个不同电阻值的情况。如果并联电阻具有相同的电阻值，则必须对每条支路的电流进行测量，直至找到无电流的支路。

【例5-20】 在图5-46中，总电流为31.09mA，并联支路两端的电压为20V。试问是否存在开路支路？如果有，开路支路是哪一条？

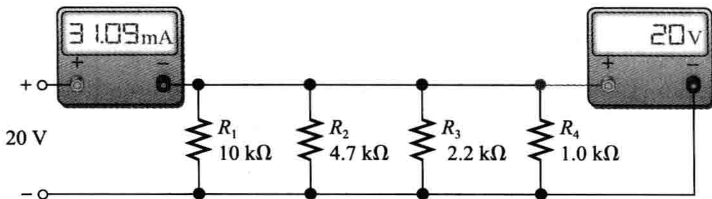


图5-46 例5-20图

解： 计算每条支路的电流。

$$I_1=\frac{V}{R_1}=\frac{20\text{V}}{10\text{k}\Omega}=2\text{mA}$$

$$I_2=\frac{V}{R_2}=\frac{20\text{V}}{4.7\text{k}\Omega}=4.26\text{mA}$$

$$I_3=\frac{V}{R_3}=\frac{20\text{V}}{2.2\text{k}\Omega}=9.09\text{mA}$$

$$I_4 = \frac{V}{R_4} = \frac{20\text{V}}{1.0\text{k}\Omega} = 20\text{mA}$$

总电流应该为

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 2\text{mA} + 4.26\text{mA} + 9.09\text{mA} + 20\text{mA}$$
$$= 35.35\text{mA}$$

实际测量得到的总电流为 31.09mA，比正常值小 4.26mA，表明具有 4.26mA 电流的支路出现开路，因此一定是 R_2 出现开路。

相关问题：如果在图 5-46 中不是 R_2 而是 R_4 出现开路，则测量的总电流是多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E05-20，测量总电流和每个电阻的电流，电路中无故障。

5.8.3 短路支路

当并联电路中某条支路短路时，电流增得很大，通常会导致电阻烧坏、熔断器烧断或断路器跳闸，这会使故障排除非常困难，因为很难分离短路支路。

脉冲发生器[㊀]和电流示踪器[㊁]是查找电路中短路的常用工具，它们不仅可以使用在数字电路中，其他类型的电路也可以使用。脉冲发生器是一个笔形工具，在电路中对所选择的点施加脉冲，通过短路路径时即产生电流脉冲。电流示踪器也是一个笔形工具，感测的是电流脉冲。跟随示踪器的电流，可以识别电流路径。

系统注释　热成像

元件总是设计成消耗一定量的功率，由制造商在出厂时标定。有时，会发生故障（如连接松散或氧化）使得元件或连接点过热。热成像是一种用于检测设备过热的工具，它感应目标对象发射的红外辐射，热成像可用于很多领域（如机械、电气、医疗等）。

作为预防性维护过程的一部分，许多制造商给设备定期做热成像。红外热成像技术的优势在于它常常可以在发生故障前就发现潜在的问题，热检查是非接触的且对温度差异非常敏感。

5.8.4 热像技术

图 5-47 显示了电磁频谱的主要部分，电磁能量占据一个连续的频带，包括可见光。我们用眼睛响应可见光部分，但是这仅是电磁频谱的一小部分。红外区域的电磁能量波长比可见光区域电磁能量的波长要长。红外区域被细分成近红外线、中红外线、远红外线。当我们在阳光下或站在一个热炉旁边时，皮肤上温度敏感的神经末梢感应到的热能正是这种远红外区域电磁能。波长比远红外线长的是微波频率及无线电波，波长小于可见光区域的是紫外线和 X-射线区域。

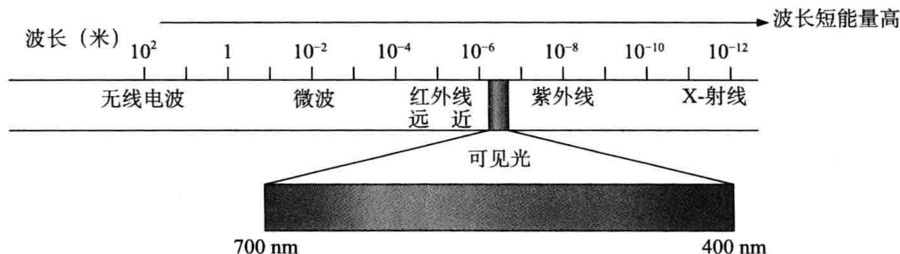


图 5-47　电磁频谱

㊀ 脉冲发生器又称逻辑脉冲发生器。——译者注

㊁ 电流示踪器又称电流探头或电子嗅觉器。——译者注

所有物体的表面都辐射电磁能量，如果所有物体都不断散发能量，那么为什么它们不会最终辐射完所有的能量进而冷却到绝对零度呢？答案是因为它们还不断地从周围环境中吸收能量。如果物体吸收的能量大于辐射出的能量，则其温度升高；如果物体吸收的能量小于辐射出的能量，则其温度下降。散发出的波长取决于物体的温度，如果物体足够热，它辐射的能量落在可见光谱区域；如果物体比较冷，辐射的能量主要在红外线区域。



图 5-48 热成像仪显示目标（一组三个熔丝）的温度曲线（承蒙福禄克公司供图）

虽然我们的皮肤对热很敏感，但是人类对热的方向检测及对热的量化上存在物理限制。热成像仪器扩展我们的感官，使我们能够对热进行测量并提供热源辐射图像。辐射图像是一个包含图像内各点温度测量计算的热图像。图像显示在屏幕上的颜色对应于从目标发射的红外辐射温度。图 5-48 显示了一个热成像仪，查看三个熔丝辐射的红外能量，图像内的颜色对应于温度。由图可以明显看出哪些熔丝承载最大电流，因为它们比较热。

热成像技术在各种领域都得到应用，被广泛用于电子工业和工业操作的故障诊断和预防性维护。它可以立即显示出太热的元件或一个不承载电流的元件，因为其温度比正常的低。在系统举例 5-1 的假负载情况，各组并联电阻要全部呈现所需的正常电阻来模拟天线，如果有电阻器开路，则总电阻将增大，将有信号反射回发射机。无须断开电路，热成像仪就能指示出开路的电阻器，因为它比其他元件冷，因此这种检测快速且是非接触式的。

本节测试题

1. 假定并联电路跨接在恒定电压源两端，如果一条并联支路开路，则在电路的电压和电流上能检测出什么变化？
2. 如果一条并联支路开路，总电阻会发生什么变化？
3. 几个灯泡并联连接，如果其中一个灯泡开路（烧坏），其他的灯还能继续亮吗？
4. 并联电路每条支路都有一安培电流，如果一条支路开路，剩下的支路中电流为多少？
5. 假设负载吸取 1.00A 的相线电流，而中性线电流为 0.90A，如果电源电压为 120V，则明显的接地路径故障电阻为多大？
6. 辐射图像的颜色代表什么？

本章小结

- 并联电阻器连接在电路的两个节点之间。
- 并联电路提供了多条电流路径。
- 并联总电阻小于最小的并联电阻值。
- 并联电路所有支路两端的电压相同。
- 基尔霍夫电流定律：流入节点的电流之和（总流入电流）等于流出节点的电流之和（总流出电流）。流入、流出一个节点的所有电流代数和等于零。
- 并联电路是一个分流器，之所以这么叫，是因为进入节点的电流被分配给连接到该节点的各个并联支路。
- 如果并联电路的所有支路电阻相同，则流过各个支路的电流也相同。
- 并联电阻电路的总功率等于构成并联电路的各个电阻器功率之和。
- 并联电路总功率可以借助功率公式用总电流值、总电阻值和总电压值来计算。
- 如果并联电路中一条支路开路，则总电阻增大，因此总电流减小。
- 如果并联电路中一条支路开路，剩下的支路仍然流过同样的电流。
- 电路的辐射图像可用于预防性维护和故障排除。

关键术语

支路（Branch）　并联电路中的一条电流路径。

分流器（Current divider）　一个并联电路，电流按反比于并联支路电阻值进行分配。

基尔霍夫电流定律（Kirchhoff's current law）　一个表述流入节点总电流等于流出节点总电流的定律。可以等价地表示为流入、流出节点的所有电流的代数和为零。

节点（Node）　电路中有两个或两个以上元件相连接的点。

并联（Parallel）　两个电路元件都联结在电路中一对节点之间的连接关系。

辐射图像（Radiometric image）　用颜色表示温度的热图。

关键公式

(5-1) $R_T = \dfrac{1}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3}+\cdots+\dfrac{1}{R_n}}$　总并联电阻

(5-2) $R_T = \dfrac{R_1 R_2}{R_1+R_2}$　两个电阻并联的特殊情况

(5-3) $R_T = \dfrac{R}{n}$　n 个等阻值电阻并联的特殊情况

(5-4) $I_{IN(1)}+I_{IN(2)}+I_{IN(3)}+\cdots+I_{IN(n)} = I_{OUT(1)}+I_{OUT(2)}+I_{OUT(3)}+\cdots+I_{OUT(m)}$　基尔霍夫电流定律

(5-5) $I_x = \left(\dfrac{R_T}{R_x}\right)I_T$　分流器的一般公式

(5-6) $I_1 = \left(\dfrac{R_2}{R_1+R_1}\right)I_T$　两支路分流器公式

(5-7) $I_2 = \left(\dfrac{R_1}{R_1+R_2}\right)I_T$　两支路分流器公式

(5-8) $P_T = P_1+P_2+P_3+\cdots+P_n$　总功率

是非测验题

1. 为求并联电阻的总电导，可以将所有各电阻的电导相加。
2. 电阻器的并联总电阻总是小于最小的电阻器。
3. 积除以和规则适用于任意个电阻器并联。
4. 并联电路中，大电阻上有大电压，而小电阻上有小电压。
5. 当在并联电路中加入新的并联支路时，总电阻增大。
6. 当在并联电路中加入新的并联支路时，总电流增大。
7. 流入一个节点的总电流总是等于流出该节点的总电流。
8. 在分流器公式 $I_x=(R_T/R_x)I_T$ 中，括号中的量是一个不大于 1 的分数。
9. 当两个电阻并联时，小的电阻将消耗小的功率。
10. 并联电阻器消耗的总功率能大于电源提供的功率。

自测题

1. 并联电路中，每个电阻器具有
   (a) 相同的电流　(b) 相同的电压
   (c) 相同的功率　(d) 上述都对
2. 当 1.2kΩ 电阻器和 100Ω 电阻器并联时，总电阻是
   (a) 大于 1.2kΩ
   (b) 大于 100Ω 但小于 1.2kΩ
   (c) 小于 100Ω 但大于 90Ω
   (d) 小于 90Ω
3. 当 330Ω 电阻器、270Ω 电阻器和 68Ω 电阻器一起并联时，总电阻为
   (a) 668Ω　(b) 47Ω
   (c) 68Ω　(d) 22Ω
4. 8 个电阻器并联，两个最小的电阻值都是 1.0kΩ，则总电阻

(a) 不确定 (b) 大于 1.0kΩ
(c) 小于 1.0kΩ (d) 小于 500Ω

5. 当在现有并联电路上再并联一个电阻器，总电阻值
(a) 减小 (b) 增大
(c) 保持相同
(d) 增加了附加电阻器的阻值

6. 如果在并联电路中去掉一个电阻器，总电阻
(a) 减小了去掉电阻器的阻值
(b) 保持不变
(c) 增大 (d) 加倍

7. 流入节点的电流有两个，一个为5A，另一个为3A，则流出节点的总电流为
(a) 2A (b) 未知
(c) 8A (d) 两者中较大的一个

8. 下列电阻器并联连接：390Ω、560Ω 和 820Ω，则流过最大电流的电阻器是
(a) 390Ω (b) 560Ω
(c) 820Ω (d) 未知电压情况下不能确定

9. 流入并联电路的总电流突然减小可能表示
(a) 一个短路 (b) 一个开路电阻
(c) 电源电压降低 (d) (b) 和 (c)

10. 在4条支路的并联电路中，每条支路的电流均为10mA，如果其中一条支路开路，其他各条支路的电流是
(a) 13.33A (b) 10mA
(c) 0A (d) 30mA

11. 在某3支路并联电路中，R_1流过10mA电流，R_2流过15mA电流，R_3流过20mA电流，测量得到的总电流为35mA，能否说明
(a) R_1开路 (b) R_2开路
(c) R_3开路 (d) 电路工作正常

12. 若总电流为100mA的电流流入3条支路组成的并联电路，其中两条支路的电流分别是40mA和20mA，第3条支路的电流为
(a) 60mA (b) 20mA
(c) 160mA (d) 40mA

13. 在印制电路板上的5个并联电阻器之一被完全短路，最可能导致的结果是
(a) 最小值电阻器被烧坏
(b) 其他电阻器中一个或多个被烧坏
(c) 电源的熔丝烧断
(d) 电阻值将变化

14. 4条并联支路的功率消耗均为1mW，总功率消耗为
(a) 1mW (b) 4mW
(c) 0.25mW (d) 16mW

故障排除：征兆与原因

参考图5-49，给每一组征兆确定原因。

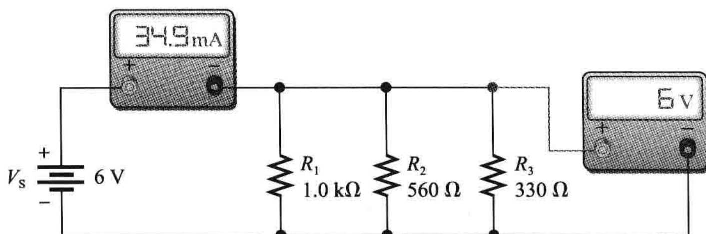


图5-49 电表指示电路的正确读数

1. 征兆：电流表和电压表读数都为零。
原因：(a) R_1开路
(b) 电压源关闭或故障
(c) R_3开路

2. 征兆：电流表读数为16.7mA，电压表读数为6V。
原因：(a) R_1开路
(b) R_2开路
(c) R_3开路

3. 征兆：电流表读数为28.9mA，电压表读数为6V。
原因：(a) R_1开路
(b) R_2开路
(c) R_3开路

4. 征兆：电流表读数为24.2mA，电压表读数为6V。

原因：(a) R_1开路

(b) R_2开路

(c) R_3开路

5. 征兆：电流表读数为34.9mA，电压表读数为0V。

原因：(a) 有电阻短路

(b) 电压表故障

(c) 电压源关闭或故障

习题

基本习题

5.1 节

1. 将图5-50中的电阻器并联接到电池两端。
2. 确定图5-51中的电阻器是否都并联接在印制电路板上，画出电路原理图并标出电阻值。其中，电阻R_1的色环颜色分别为：红、红、橙、金；电阻R_2的色环颜色分别为：黄、紫、橙、金；电阻R_3的色环颜色分别为：棕、黑、橙、金；电阻R_4的色环颜色分别为：棕、红、橙、金；电阻R_5的色环颜色分别为：橙、白、橙、金；电阻R_6的色环颜色分别为：棕、绿、橙、金；电阻R_7的色环颜色分别为：蓝、灰、橙、金；电阻R_8的色环颜色分别为：绿、蓝、橙、金。

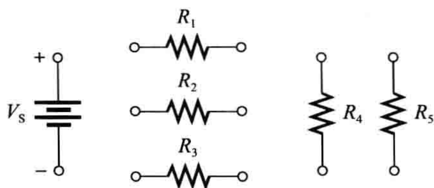


图5-50 习题1图

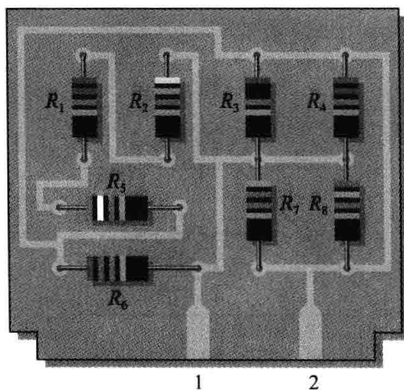


图5-51 习题2、习题3图

5.2 节

3. 试确定图5-51中引脚1和引脚2之间的总电阻。
4. 下列电阻器并联连接：1.0MΩ、2.2MΩ、4.7MΩ、12MΩ、22MΩ，试确定总电阻。
5. 求图5-52中每组并联电阻器节点A和B之间的总电阻。在图5-52a中，电阻R_1的色环颜色分别为：黄、紫、黑、银；电阻R_2的色环颜色分别为：绿、蓝、黑、银。在图5-52b中，电阻R_1的色环颜色分别为：绿、蓝、棕、银；电阻R_2的色环颜色分别为：棕、黑、红、银。在图5-52c中，电阻R_1的色环颜色分别为：棕、黑、橙、金；电阻R_2的色环颜色分别为：红、红、红、金；电阻R_3的色环颜色分别为：棕、绿、红、银。在图5-52d中，电阻R_1的色环颜色分别为：红、红、绿、金；电阻R_2的色环颜色分别为：棕、黑、红、银；电阻R_3的色环颜色分别为：棕、黑、绿、银；电阻R_4的色环颜色分别为：黄、紫、黄、银。

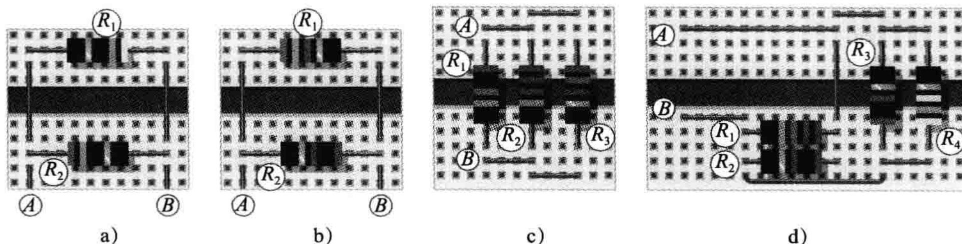


图5-52 习题5图

6. 对图5-53中的每个电路求R_T。
7. 11个22kΩ的电阻器并联，总电阻为多少？
8. 5个15Ω、10个100Ω、两个10Ω的电阻器并联在一起，总电阻为多少？

5.3 节

9. 有4个等阻值的电阻器并联，如果总电压为12V、总电阻为600Ω，试问每个并联电阻两端的电压为多少？流过每个电阻器的电流为多少？

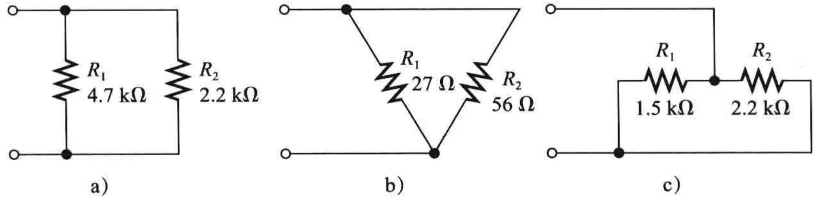


图5-53 习题6图

10. 图5-54中的电源电压为100V，试问3个电压表读出的电压分别为多少？

5.4 节

11. 在图5-55所示的每个电路中，总电流I_T分别是多少？

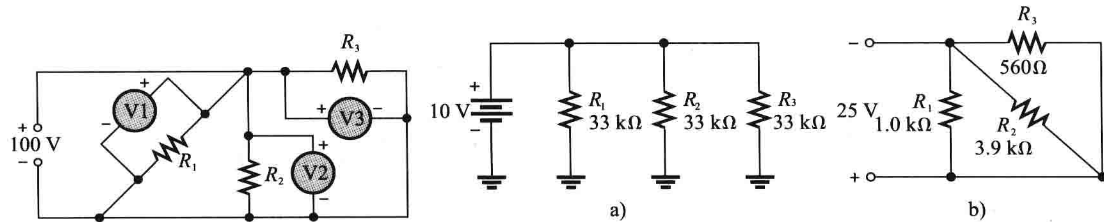


图5-54 习题10图

图5-55 习题11图

12. 60W灯泡的电阻大约为240Ω，当3个灯泡并联在120V电源上时，电源流出的电流为多少？
13. 在图5-56所示的电路中，每个电阻器的电流分别是多少？

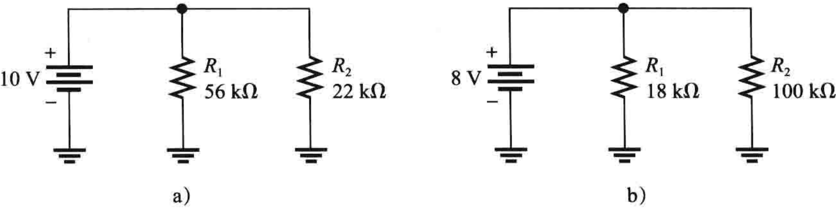


图5-56 习题13图

14. 4个等阻值电阻器并联，给并联电路加5V电压，测得电源的电流为2.5mA，试问各个电阻器的电阻值是多少？

5.5 节

15. 在3支路并联电路中，相同方向测得下列电流：250mA、300mA和800mA，试问流入这3条支路连接的节点的电流值是多少？
16. 总电流为500mA的电流流入5个并联的电阻器，流过4个电阻器的电流分别是50mA、150mA、25mA和100mA，试问流过第5个电阻器的电流是多少？
17. 在图5-57中，如果R_2和R_3具有相同电阻值，试问流过R_2和R_3的电流为多大？说明测量电流的电流表连接方法。

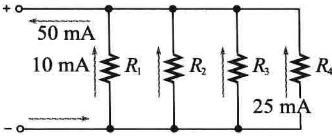


图5-57 习题17图

18. 某挂车有 4 个行驶灯（每个吸取 0.5A 电流）和两个尾灯（每个吸取 1.2A 电流），当尾灯和行驶灯全部点亮时供给该拖车的电流是多少？
19. 假设习题 18 中的拖车有两个各吸取 1A 电流的刹车灯，
(a) 当所有灯都亮时，供给拖车的电流为多少？
(b) 在这种条件下，从拖车接地流回的电流是多少？

5.6 节

20. 一个 10kΩ 电阻器和一个 15kΩ 电阻器与电压源并联，试问哪个电阻器的电流最大？
21. 在图 5-58 中各个电流表指示的支路电流应该为多少？
22. 应用分流公式确定图 5-59 所示电路中每条支路的电流。

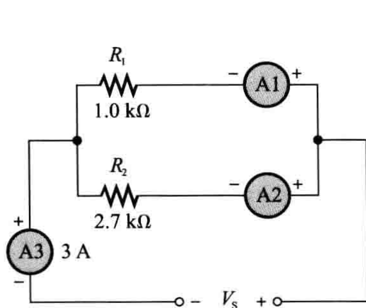
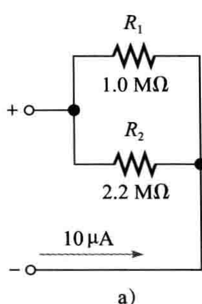


图 5-58　习题 21 图



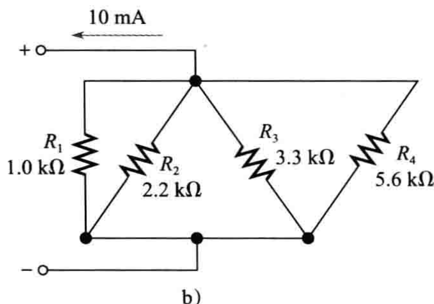


图 5-59　习题 22、习题 24 图

5.7 节

23. 5 个电阻器并联，每个电阻器消耗功率 40mW，试问总功率是多少？
24. 试确定图 5-59 中各电路的总功率。
25. 6 个灯泡并联在 120V 两端，每个灯泡额定功率都是 75W，试问每个灯泡的电流和总电流分别为多少？

5.8 节

26. 如果在习题 25 中有一个灯泡烧坏，试问剩下的灯泡各流过多少电流？总电流是多少？
27. 在图 5-60 中，电流和电压测量值如图中所示，试问是否有电阻器开路？如果有，是哪一个？
28. 试问图 5-61 中电路有什么问题？

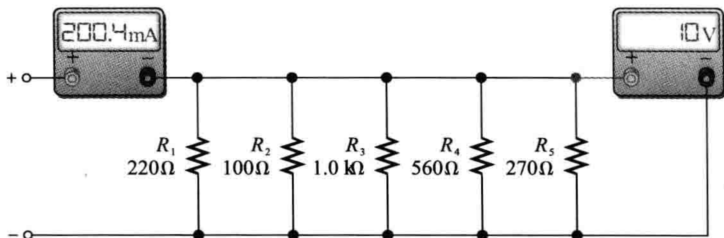


图 5-60　习题 27 图

29. 在图 5-62 中找出开路的电阻器。
30. 从图 5-63 中欧姆表的读数能否说出有电阻器开路？如果有，请指出来。

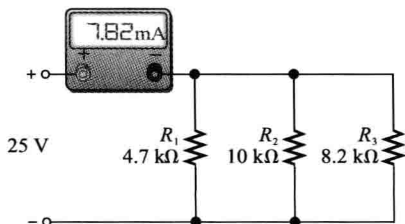


图 5-61　习题 28 图

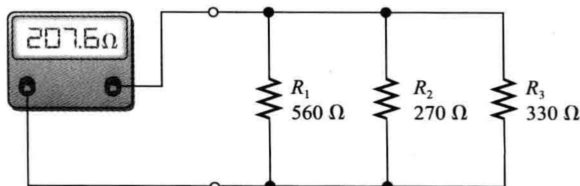


图 5-62　习题 29 图

高级习题

31. 在图 5-64 所示的电路中，请确定电阻值 R_2、R_3和 R_4。

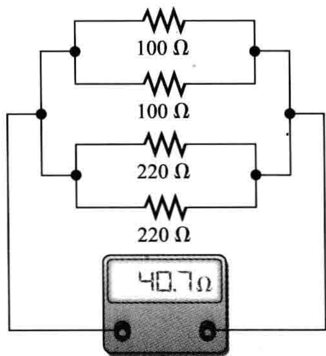


图 5-63 习题 30 图

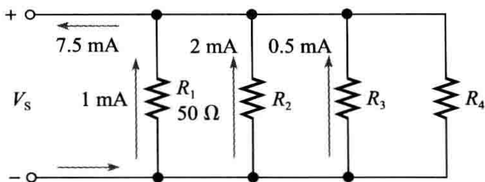


图 5-64 习题 31 图

32. 并联电路总电阻为 25Ω，如果总电流为 100mA，试问该并联电路中的 220Ω 电阻器流过多少电流？

33. 试问流过图 5-65 中各个电阻器的电流是多少？R 是最小阻值的电阻器，其他电阻器的倍数值如图中所示。

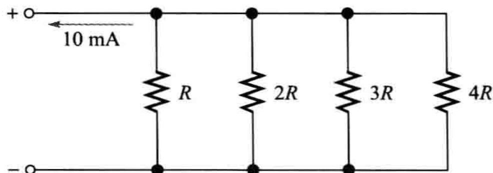


图 5-65 习题 33 图

34. 某并联电路仅由 1/2W 相同阻值的电阻器构成，总电阻为 1kΩ，总电流为 50mA。如果每个电阻器都工作在一半功率水平，请确定下列各量。

   (a) 电阻器数量 (b) 电阻器的阻值
   (c) 每条支路的电流 (d) 施加的电压

35. 求图 5-66 所示电路中未知量的值。

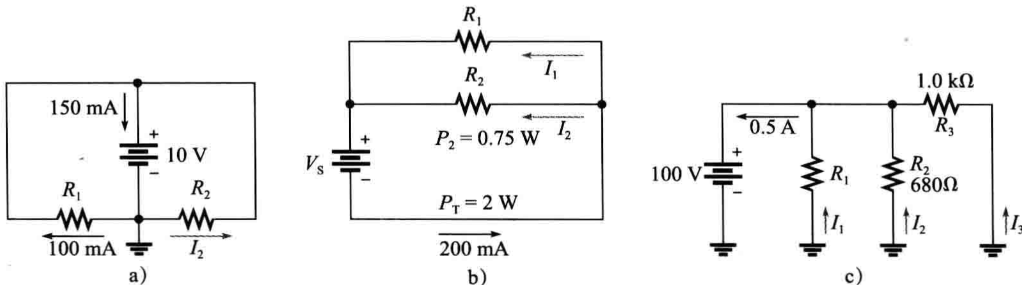


图 5-66 习题 35 图

36. 试问在下列条件下图 5-67 中 A 端与地之间的总电阻为多少？

   (a) SW1 和 SW2 均开路
   (b) SW1 闭合、SW2 开路
   (c) SW1 开路、SW2 闭合
   (d) SW1 和 SW2 均闭合

37. 图 5-68 中 R_2 为何值时将引起电流过大？

38. 在图 5-69 中根据每个开关的位置确定电源流出的总电流和流过每个电阻器的电流。

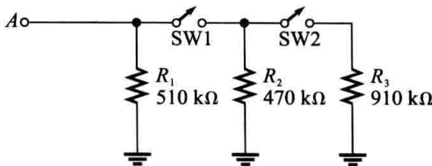


图 5-67 习题 36 图

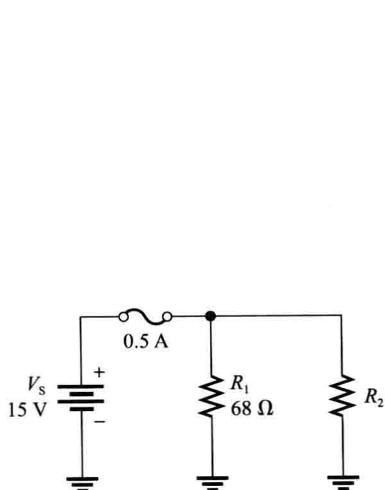


图 5-68　习题 37 图

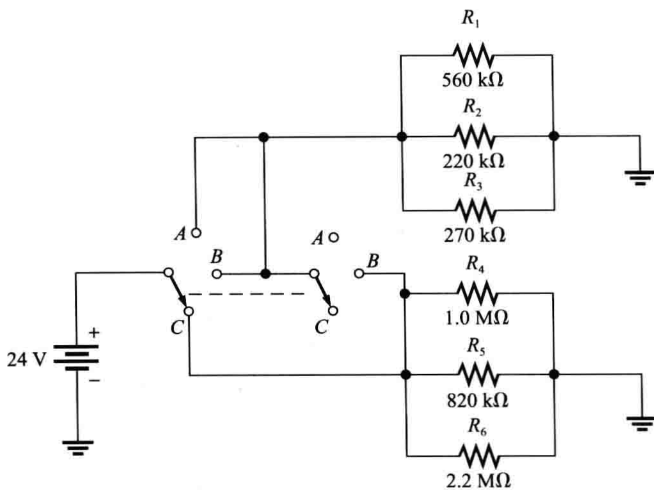


图 5-69　习题 38 图

39. 房间电路用 15A 断路器保护，一个吸取 5.0A 电流的空间加热器插入墙上的插座中，两个吸取 0.833A 电流的台灯插在另外的插座上，试问吸取 5.0A 电流的吸尘器能否插入同一电路而不超过断路器电流？请解释原因。

40. 并联电路的总电阻为 25Ω，如果总电流为 100mA，试问并联电路中的 220Ω 电阻器中流过的电流为多少？

41. 试辨别图 5-70 所示的双面印制电路板上哪一组电阻器是并联连接，并确定每组的总电阻。其中，电阻 R_1 的色环颜色分别为：棕、黑、黄、金；电阻 R_2 的色环颜色分别为：红、红、黄、金；电阻 R_3 的色环颜色分别为：橙、橙、黄、金；电阻 R_4 的色环颜色分别为：红、紫、黄、金；电阻 R_5 的色环颜色分别为：绿、蓝、黄、金；电阻 R_6 的色环颜色分别为：棕、黑、绿、金；电阻 R_7 的色环颜色分别为：灰、红、黄、金；电阻 R_8 的色环颜色分别为：蓝、灰、黄、金；电阻 R_9 的色环颜色分别为：橙、白、黄、金；电阻 R_{10} 的色环颜色分别为：棕、红、绿、金；电阻 R_{11} 的色环颜色分别为：棕、灰、绿、金；电阻 R_{12} 的色环颜色分别为：棕、黑、黄、金。

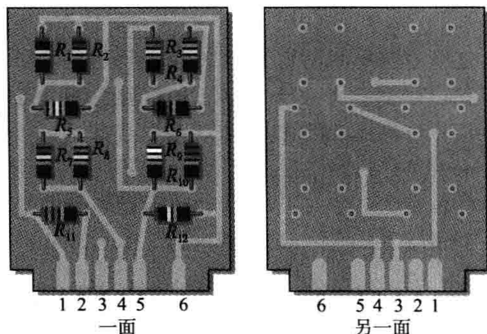


图 5-70　习题 41 图

42. 如果图 5-71 中总电阻是 200Ω，试问 R_2 的值为多少？

43. 试确定图 5-72 中的未知电阻。

44. 总电阻为 1.5kΩ 的并联电路存在 250mA 的流入总电流，若要使电流增大 25%，试确定应增加多大电阻值的电阻器并联到这个电路中。

45. 画出图 5-73 设置的电路原理图，如果在红、黑导线之间加 25V 电压，确定有何错误。其中，图 5-73b 中电阻 R_1 的色环颜色分别为黄、紫、红、金；R_2 与 R_3 的色环颜色相同，均为：棕、黑、橙、金。

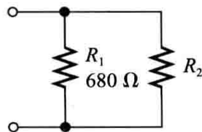


图5-71　习题 42 图

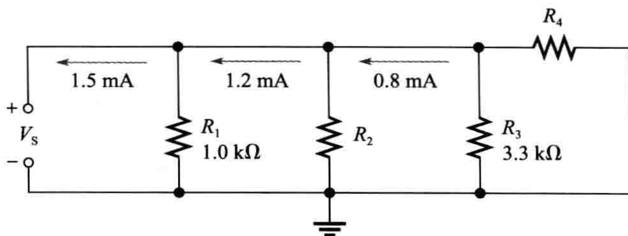
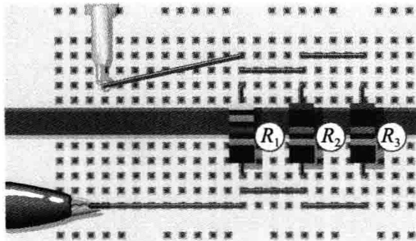


图 5-72　习题 43 图



a) 电表的黄表笔接面包板，红表笔接25V电源正极端



b) 带连接线的面包板，黄线来自电表，灰色线来自25V电源的地，红表笔接+25V

图 5-73 习题 45 图

46. 参考系统举例 5-1，如果要用 1W、1%的标准值电阻器设计一个 10W、75Ω 的负载，请问应该选用什么阻值？画出完整的设计。

47. 某假负载的值如图 5-74 所示，除了 R_{14} 和 R_{15} 的额定功率为 1/2W 外，所有其他电阻的额定功率均为 2W。(a) 负载电阻为多大？(b) 额定功率为多大？

48. 参考系统举例 5-2，在该例中 R_{SH2} 的正确值应为多大？

49. 假设有一个 100μA 满刻度偏转电流的表头，内阻为 80Ω，为使电表测量 1mA 满量程电流，试问要接多大的分流电阻？

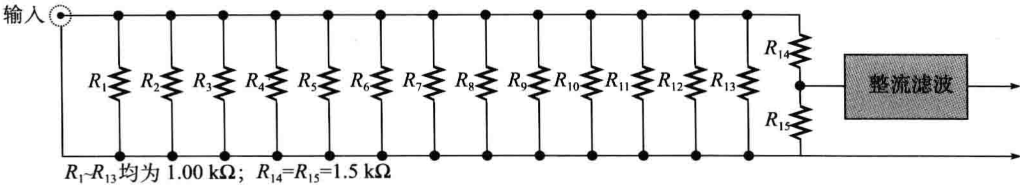


图 5-74 习题 47 图

Multisim 故障排除习题

50. 打开文件 P05-50，使用电流测量，试确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。

51. 打开文件 P05-51，用电流测量，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。

52. 打开文件 P05-52，用电阻测量，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。

53. 打开文件 P05-53，测量每个电路的总电阻并与计算值进行比较。

各节测试题答案

5.1 节

1. 并联电阻器均接在相同的两点之间。
2. 并联电路在两个给定点之间有一条以上的电流路径。
3. 见图 5-75。
4. 见图 5-76。

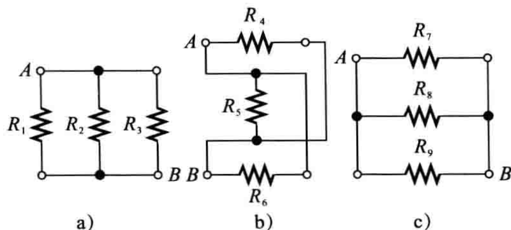


图 5-75

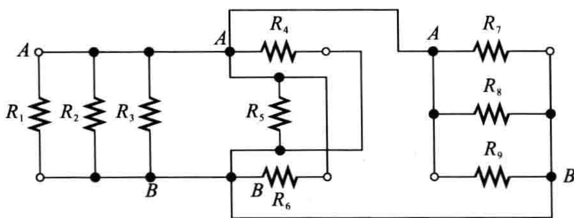


图 5-76

5.2 节

1. 随着更多电阻器并联，总电阻减小。
2. R_T总是小于最小电阻值。
3. R_T＝2.2kΩ /12 ＝183Ω

5.3 节

1. 5V
2. V_{R2}＝118V；V_S＝118V
3. V_{R1}＝50V；V_{R2}＝50V
4. 所有并联支路两端电压相同。

5.4 节

1. I_T＝ 12V/（680Ω/3）＝ 53mA
2. V_S＝ 20mA×（680Ω || 330Ω）＝ 4.44 V
3. I_1＝4.44V/680Ω＝6.53mA；
   I_2＝4.44V/330Ω＝13.5mA
4. R_T＝4×12V/6mA）＝8kΩ
5. V＝（1.0kΩ || 2.2kΩ)×100mA＝68.8V

5.5 节

1. 基尔霍夫电流定律：在一个节点的电流代数和为零；流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和。
2. I_1＋ I_2＋ I_3＝ 2.5 A
3. 100mA ＋ 300mA ＝ 400mA
4. 4A
5. 10A

5.6 节

1. 22Ω 电流最大，220Ω 电流最小。
2. I_3＝（R_T/R_3)×4mA＝（113.6Ω/470Ω)×4mA ＝ 967μA
3. I_2＝（R_T/680Ω)×10mA＝3.27mA；
   I_1＝（R_T/330Ω)×10mA＝6.73mA

5.7 节

1. 将每个电阻器的功率相加得 P_T。
2. P_T＝1W＋2W＋5W＋8W＝16W
3. P_T＝（1mA)^2R_T＝615μW
4. 正常电流是 I＝P/V＝100W/12.6V＝7.9A，选 10A 的熔丝。

5.8 节

1. 当一条并联支路开路时，电压没有变化，总电流减小。
2. 当有支路开路时，总电阻小于正常值。
3. 是的，其他灯泡继续发光。
4. 每条非开路支路保持 1A 电流。
5. 由基尔霍夫电流定律，接地返回电流为 0.10A 并呈现为并联返回路径。根据欧姆定律，R＝120V/0.1A＝1200Ω。
6. 温度。

例题中相关问题答案

例 5-1　无需重新布线。

例 5-2　引脚 1 接引脚 2，引脚 3 接引脚 4。

例 5-3　9.34Ω

例 5-4　用“按 ＋ 键”替换步骤 9，
显示 $100^{-1}+47^{-1}+22^{-1}+$；
用“键入 33”替换步骤 10，
显示 $100^{-1}+47^{-1}+22^{-1}+33$；
第 11 步：按 x^{-1}键，
显示 $100^{-1}+47^{-1}+22^{-1}+33^{-1}$；
第 12 步：按 ENTER 键，显示 107.034171502E^{-3}；
第 13 步，按 x^{-1}键，然后按 ENTER 键，显示 9.34281067406E^0。

例 5-5　132Ω

例 5-6　33.3kΩ

例 5-7　25V

例 5-8　I_1＝ 100mA；I_2＝ 179mA；
100mA ＋ 179mA ＝ 279mA

例 5-9　I_1＝20.0mA；I_2＝9.09mA；I_3＝35.7mA；I_4＝22.0mA

例 5-10 31.9mA

例 5-11 2.0Ω

例 5-12 $I=V/R_{TAIL}=12.6V/10.5\Omega=1.2A$

例 5-13 20mA

例 5-14 $I_T=112mA$；$I_2=50mA$

例 5-15 2.5 mA；5 mA

例 5-16 $I_1=1.63mA$；$I_2=3.35mA$

例 5-17 $I_1=59.4mA$；$I_2=40.6mA$

例 5-18 1.78W

例 5-19 81W

例 5-20 15.4mA

是非测验题答案

1.T 2.T 3.F 4.F 5.F 6.T 7.T 8.T 9.F 10.F

自测题答案

1.（b） 2.（c） 3.（b） 4.（d） 5.（a） 6.（c） 7.（c） 8.（c） 9.（d） 10.（b） 11.（a） 12.（d） 13.（c） 14.（b）

故障排除：征兆与原因的答案

1.（b） 2.（c） 3.（a） 4.（b） 5.（b）

第6章 串并联电路

本章目标

- 识别串并联关系
- 分析串并联电路
- 分析带有负载的分压器
- 确定电压表在电路中的负载效应
- 惠斯通电桥的分析与应用
- 利用戴维南定理简化电路分析
- 应用最大功率传输定理
- 应用叠加定理分析电路
- 串并联电路故障排除

在电子系统中常常会发现各种串联和并联电阻的组合，本章将研究和分析这类串并联组合，介绍广泛用于测量系统的称为惠斯通电桥的重要电路；学习如何利用戴维南定理简化复杂电路；讨论最大功率传输定理，这将用于要求给定电路向负载提供最大功率的应用中；利用叠加定理分析含有多个电压源的电路；本章还包含串并联电路短路和开路的故障排除。

6.1 识别串并联关系

串并联电路由串联和并联电流路径的组合构成，分析这类电路最重要的是要能够识别电路中元件串联或并联的关系。

学习完本节内容，`应该能够

- 识别串并联关系；
- 分辨在给定电路中各个电阻器与其他电阻的关系；
- 确定印制电路板上的串并联关系。

图 6-1 显示了一个电阻器简单串并联组合的例子，注意，从 A 到 B 的电阻为 R_1，从 B 到 C 的电阻为 R_2 和 R_3 的并联（$R_2 \parallel R_3$），因为这两个电阻都接在相同的节点对（节点 B 和节点 C）之间，从 A 到 C 的总电阻为 R_1 与 R_2 和 R_3 的并联组合相串联，如图 6-1b 所示。

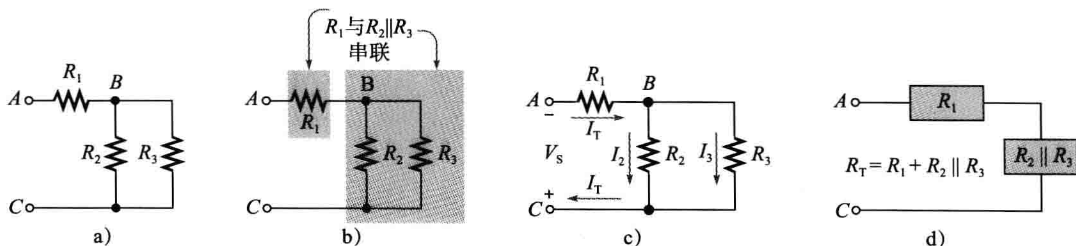


图 6-1　简单串并联电阻电路

当图 6-1 的串并联电阻接到电压源上时，如图 6-1c 所示，流过电阻 R_1 的总电流在 B 点被分流到两条并联路径，两条分支电流然后再合成总电流流入电源正端，电阻的关系用方框图如图6-1d所示。

为了进一步说明串并联关系，现在我们在图 6-1a 中一步一步地增加复杂性。

1. 在图 6-2a 中，R_4与R_1串联，现在从A到B的电阻为R_1+R_4，这个串联组合再与R_2和R_3的并联组合相串联，如图 6-2b 所示，图 6-2c 给出了电阻关系的方框图。

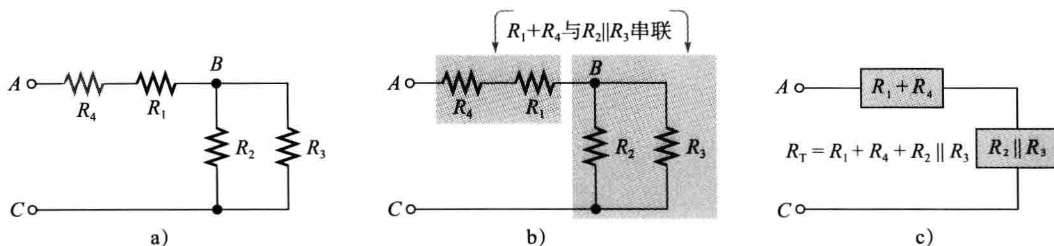


图 6-2 R_4加到电路中与R_1串联

2. 在图 6-3a 中，R_5与R_2串联连接，R_2和R_5的这个串联组合再与R_3并联，这个串并联组合再与R_1+R_4相串联，如图 6-3b 所示，方框图如图 6-3c 所示。

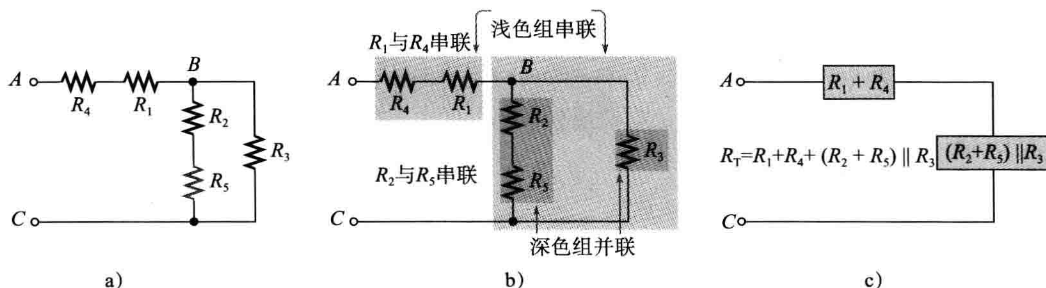


图 6-3 R_4加到电路中与R_2串联

3. 在图 6-4a 中，R_6与R_1和R_4的串联组合并联连接，R_1、R_4和R_6的串并联组合再与R_2、R_3和R_5的串并联组合作串联连接，如图 6-4b 所示，方框图如图 6-3c 所示。

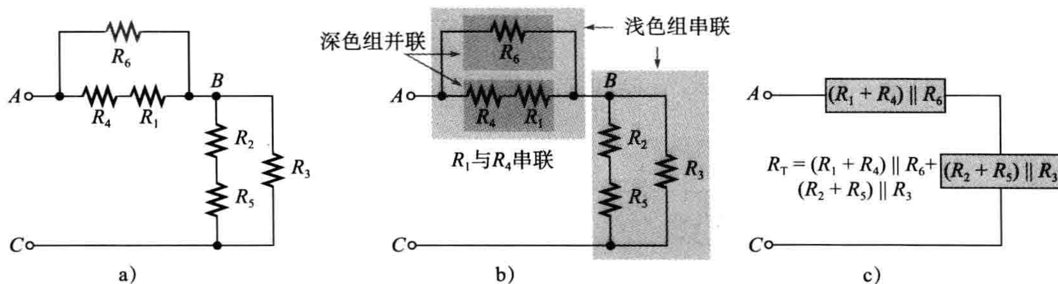


图 6-4 R_6加到电路中与R_1和R_4的串联组合并联

【例 6-1】 识别图 6-5 中的串并联关系。

解： 从电源的负端开始，沿电流路径

1）电源产生的所有电流都必须流经R_1，它与电路的其他部分串联。

2）到节点A，总电流分成两条路径，一部分流经R_2，另一部分流经R_3。

3）电阻R_2与R_3相互并联，因为它们接在相同节点对之间，这个并联组合再与R_1串联。

4）在节点B，流经R_2和R_3的电流合起来流入单一路径，因此总电流流经R_4。

5）电阻R_4与R_1及R_2和R_3的并联组合串联。

电流如图 6-6 所示，其中，I_T为总电流。综合起来，R_1和 R_4与 R_2和 R_3的并联组合串联。

$$R_1+R_4+R_2 \parallel R_3$$

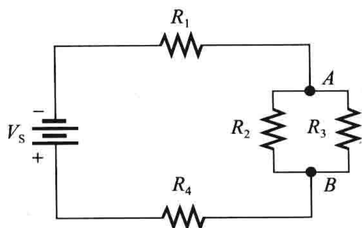


图　6-5

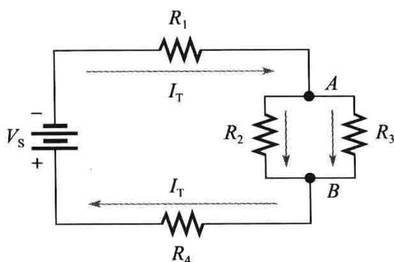


图 6-6　串并联组合电路图

相关问题：如果在图 6-6 中将另一个电阻 R_5从节点 A 接到电源的正端，试问它与其他电阻的关系是什么？

【例 6-2】　试描述图 6-7 中 A 端和 D 端之间的串并联组合。

解：在节点 B 和 C 之间有两条并联路径。

1）下面一条路径由 R_4构成。

2）上面一条路径由 R_2和 R_3的串联组合构成。

该并联组合再与电阻 R_1和 R_5串联。综合起来，R_1与 R_5串联，再与 R_4和（R_3+R_3）的并联组合相串联。

$$R_1+R_5+R_4 \parallel (R_2+R_3)$$

相关问题：如果在图 6-7 中从节点 C 到节点 D 接一个电阻，试描述其在电路中的关系。

【例 6-3】　试描述图 6-8 中每对端子之间的总电阻。

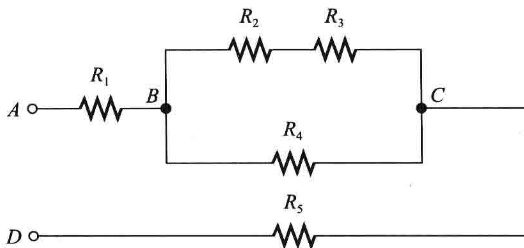


图　6-7

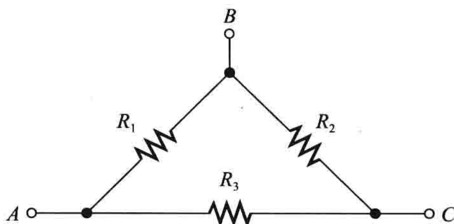


图　6-8

解：1）从 A 到 B：R_1与 R_2和 R_3的串联组合并联。

2）从 A 到 C：R_3与 R_1和 R_2的串联组合并联。

3）从 B 到 C：R_2与 R_1和 R_3的串联组合并联。

相关问题：在图 6-8 中，如果在 C 端到接地端之间增加一个新电阻 R_4，试描述每个端子到接地端之间的总电阻，现有电阻都不直接与接地端相连接。

在面包板上按原理图连接电路时，为了更便于检查，应使面包板上的电阻及其连接与原理图上绘制的位置大致匹配。在某些情况下，由于绘制方式的原因，在原理图上串并联关系很难一下就看出来，这时可以重新绘制原理图，使串并联关系变得清晰。印制电路板或面包板上元件的物理布置通常与实际的电气关系并不一致，通过在图纸上跟踪电路和重新布局元件使之成为便于识别的形式，可以确定出串并联的关系。

【例 6-4】 试确定图 6-9 中的串并联关系。

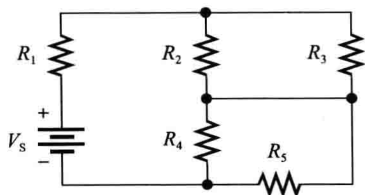


图 6-9

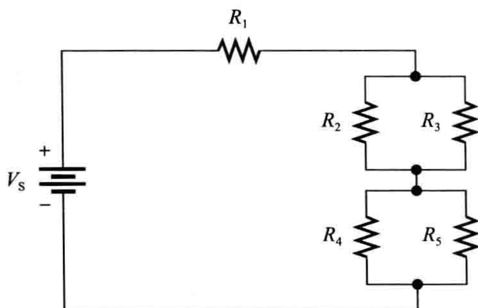


图 6-10

解： 为了更好地识别串并联关系，重新绘制电路原理图如图 6-10 所示。现在可以看出，R_2和 R_3互相并联，R_4和 R_5也互相并联，这两个并联组合互相串联，然后再与 R_1串联。

$$R_1 + R_2 \parallel R_3 + R_4 \parallel R_5$$

相关问题：在图 6-10 中，如果在 R_3底端到 R_5顶端接一个电阻，试问它对电路有什么影响？请解释。

本节测试题

1. 某串并联电路描述如下：R_1与 R_2并联，该并联组合与另一 R_3和 R_4的并联组合串联，试画出这个电路。
2. 在图 6-11 所示的电路中，试描述电阻的串并联关系。
3. 试问图 6-12 中哪些电阻并联？
4. 试确定图 6-13 中的并联电阻。
5. 试问图 6-13 中的并联组合是否串联？

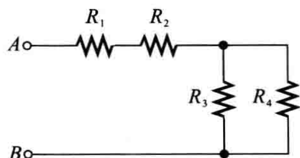


图 6-11

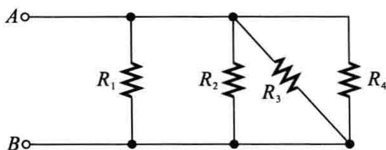


图 6-12

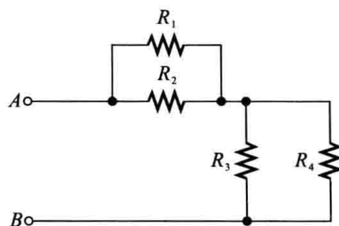


图 6-13

6.2 串并联电阻电路分析

串并联电路的分析有多种方法，这取决于需要分析得到的信息以及已知电路的值。本节的例子虽然并不能完全覆盖各种情况，但可以提供处理串并联电路分析的思路。

学习完本节内容，应该能够

- 分析串并联电路；
- 确定总电阻；
- 确定所有电流；
- 确定所有电压降。

如果已知了欧姆定律、基尔霍夫定律、分压公式和分流公式，并且知道如何运用这些定律，那么就能够解决大部分电阻电路分析问题。当然，识别串并联组合的能力是基础，没有一个可以适用于所有情况的标准的“食谱”方法，逻辑思维是用于解决问题的最强大工具。

6.2.1 总电阻

我们在第 4 章学习了如何确定串联总电阻，在第 5 章学习了如何确定并联总电阻，为了找出串并联组合的总电阻(R_T)，首先要识别串联和并联关系，然后通过求出相应的串联、并联总电阻来简化电路。下面两个例子说明了一般分析过程。

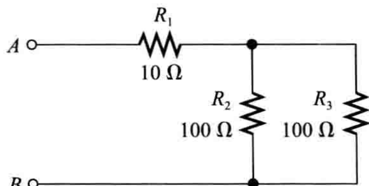


图 6-14

【例 6-5】 试确定图 6-14 所示的电路中 A、B 端之间的 R_T。

解： 电阻 R_2 与 R_3 并联，该并联组合与 R_1 串联。首先求 R_2 与 R_3 的并联电阻，因为 R_2 与 R_3 数值相等，所以并联电阻为其数值除以 2。

$$R_{2\|3}=\frac{R}{n}=\frac{100\Omega}{2}=50\Omega$$

现在，因为 R_1 与 $R_{2\|3}$ 串联，R_T 为它们的值相加。

$$R_T=R_1+R_{2\|3}=10\Omega+50\Omega=60\Omega$$

相关问题：如果在图 6-14 中 R_3 的值变为 82Ω，试确定 R_T。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E06-05，用万用表验证总电阻的计算值。将 R_1 改为 18Ω、R_2 改为 82Ω、R_3 改为 82Ω，测量总电阻。

【例 6-6】 求图 6-15 所示电路中的 R_T。

解： 1）节点 A 和 B 之间的上面一条支路 R_2 与 R_3 串联，该串联组合记为 R_{2+3}，等于 R_2+R_3。

$$R_{2+3}=R_2+R_3=47\Omega+47\Omega=94\Omega$$

2）下面一条支路中，R_4 与 R_5 相互并联，记为 $R_{4\|5}$。

$$R_{4\|5}=\frac{R_4R_5}{R_4+R_5}=\frac{68\Omega\times39\Omega}{68\Omega+39\Omega}=24.8\Omega$$

3）同样在下面一条支路中，R_4 和 R_5 的并联组合与 R_6 串联，该串并联组合记为 $R_{4\|5+6}$。

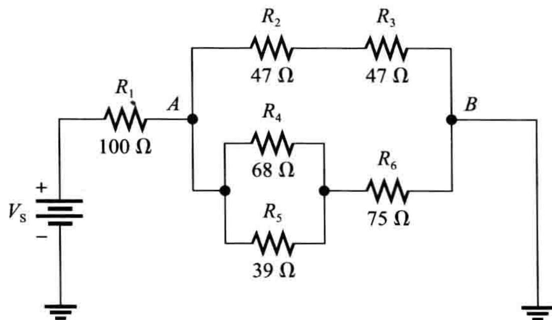


图 6-15

$$R_{4\|5+6}=R_6+R_{4\|5}=75\Omega+24.8\Omega=99.8\Omega$$

图 6-16 显示了原电路的简化等效形式。

4）现在能够求节点 A 和 B 之间的电阻，为 R_{2+3} 与 $R_{4\|5+6}$ 并联。等效电阻计算如下：

$$R_{AB}=\frac{1}{\frac{1}{R_{2+3}}+\frac{1}{R_{4\|5+6}}}=\frac{1}{\frac{1}{94\Omega}+\frac{1}{99.8\Omega}}=48.4\Omega$$

5）最后，总电阻为 R_1 与 R_{AB} 串联。

$$R_T=R_1+R_{AB}=100\Omega+48.4\Omega=148\Omega$$

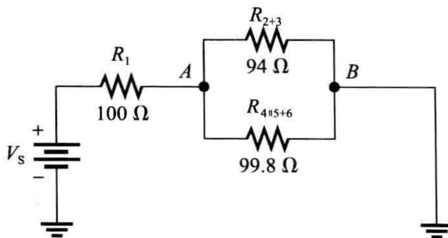


图 6-16

相关问题：在图 6-16 所示的电路中，如果从节点 A 到节点 B 接一个 68Ω 的电阻，试确定 R_T。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E06-06，验证计算的总电阻值。从电路中移去 R_5，测量总电阻，然后用计算的总电阻检查测量值。

6.2.2　总电流

一旦知道了总电阻与电源电压，就能应用欧姆定律求电路的电流，总电流为电源电压除以总电阻。

$$I_T = \frac{V_S}{R_T}$$

例如，求例 6-6 中电路（图 6-15）的总电流，假设电源电压为 10V，则计算为

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{10V}{148\Omega} = 67.6mA$$

6.2.3　分支电流

利用分流公式、基尔霍夫定律、欧姆定律，我们就能够求解串并联电路中任意分支的电流。在某些情况下，求解给定电流需要反复使用公式。

【例 6-7】　如果 $V_S = 5.0V$，试确定图 6-17 中流过 R_4 的电流。

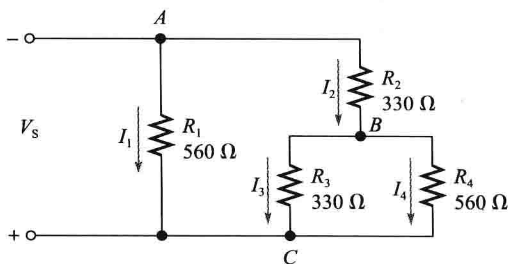


图　6-17

解： 首先求流入节点 B 的电流（I_2），一旦已知这个电流，即可利用分流公式求解流过 R_4 的电流 I_4。

注意电路中有两个主分支，最左边的分支仅由 R_1 构成，最右边的分支是由 R_2 与 R_3 和 R_4 的并联组合串联构成，加在两个主分支两端的电压都等于 5.0V。计算最右边主分支的等效电阻（$R_{2+3||4}$），然后再应用欧姆定律求出流过这个主分支的总电流。因此，

$$R_{2+3||4} = R_2 + \frac{R_3R_4}{R_3+R_4} = 330\Omega + \frac{330\Omega \times 560\Omega}{890\Omega} = 538\Omega$$

$$I_2 = \frac{V_S}{R_{2+3||4}} = \frac{5.0V}{538\Omega} = 9.29mA$$

利用两电阻分流公式计算 I_4。

$$I_4 = \left(\frac{R_3}{R_3+R_4}\right)I_2 = \frac{330\Omega}{890\Omega} \times 9.29mA = 3.45mA$$

相关问题：求图 6-17 中的 I_1、I_3 和 I_T。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E06-07，测量每个电阻的电流，比较测量值与计算值。

6.2.4　电压关系

图 6-18 所示的电路用于说明串并联电路的电压关系，接入电压表测量每一个电阻的电压，测量读数标注在图中。

从图 6-18 可观察得到如下结论：

1）因为 R_1 与 R_2 并联，所以 V_{R1} 与 V_{R2} 相等（并联支路两端电压相等），V_{R1} 和 V_{R2} 与从 A 到 B 的电压相同。

2）因为 R_3 与 R_4 和 R_5 的串联组合相并联，所以 V_{R3} 等于 $V_{R4}+V_{R5}$（V_{R3} 与从 B 到 C 的电压相同）。

3）因为 R_4 为 R_4+R_5 的 1/3，所以 V_{R4} 为从 B 到 C 电压的 1/3（根据分压准则）。

4）因为 R_5 为 R_4+R_5 的 2/3，所以 V_{R5} 为从 B 到 C 电压的 2/3。

5）根据基尔霍夫电压定律，闭合路径的电压降代数和必须等于零，所以 $V_{R1}+V_{R3}-V_S=0$。

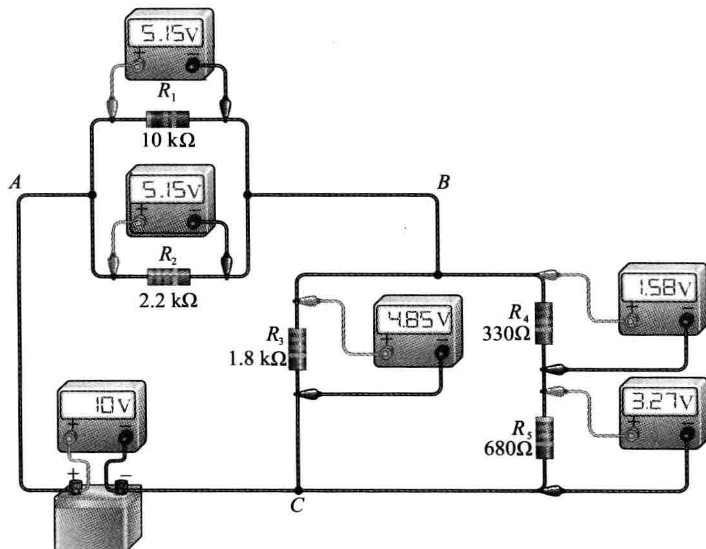


图 6-18　电压关系演示

例 6-8 将验证图 6-18 的电表读数。

【例 6-8】　检验图 6-18 中电压表读数的正确性，将电路重新画成如图 6-19 所示的原理图。

解： 从 A 到 B 的电阻是 R_1 与 R_2 的并联组合。

$$R_{AB}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{1.0\text{k}\Omega\times2.2\text{k}\Omega}{3.2\text{k}\Omega}=688\Omega$$

从 B 到 C 的电阻是 R_3 与 R_4 和 R_5 的串联组合相并联。

$$R_4+R_5=330\Omega+680\Omega=1010\Omega=1.01\text{k}\Omega$$

$$R_{BC}=\frac{R_3(R_4+R_5)}{R_3+R_4+R_5}=\frac{1.8\text{k}\Omega\times1.01\text{k}\Omega}{2.81\text{k}\Omega}=647\Omega$$

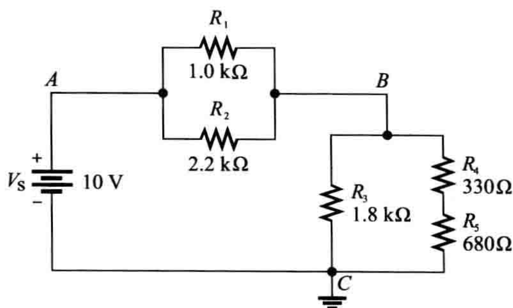


图　6-19

从 A 到 B 的电阻与从 B 到 C 的电阻串联，所以总电路电阻为

$$R_T=R_{AB}+R_{BC}=688\Omega+647\Omega=1335\Omega$$

利用分压准则计算各个电压。

$$V_{AB}=\left(\frac{R_{AB}}{R_T}\right)V_S=\frac{688\Omega}{1335\Omega}\times10\text{V}=5.15\text{V}$$

$$V_{BC}=\left(\frac{R_{BC}}{R_T}\right)V_S=\frac{647\Omega}{1335\Omega}\times 10V=4.85V$$

$$V_{R1}=V_{R2}=V_{AB}=5.15V$$

$$V_{R3}=V_{BC}=4.85V$$

$$V_{R4}=\left(\frac{R_4}{R_4+R_5}\right)V_{BC}=\frac{330\Omega}{1010\Omega}\times 4.85V=1.58V$$

$$V_{R5}=\left(\frac{R_5}{R_4+R_5}\right)V_{BC}=\frac{680\Omega}{1010\Omega}\times 4.85V=3.27V$$

相关问题：如果电源电压加倍，请确定图 6-19 中的各个电压降。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E06-08，测量每个电阻的电压并与计算值比较。如果电源电压加倍或减半，通过测量验证各个电压降。

【例 6-9】 确定图 6-20 中每个电阻两端的电压降。

解： 由于已知总电压，因此可以构成等效串联电路使用分压公式求解问题。

第一步：将每个并联组合简化为等效电阻，因为 R_1 与 R_2 并联在节点 A 和 B 之间，等效电阻

$$R_{AB}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{3.3k\Omega\times 6.2k\Omega}{9.5k\Omega}=2.15k\Omega$$

由于 R_4 与 R_5 和 R_6 的串联组合并联在节点 C 到 D 之间，因此等效电阻为

$$R_{CD}=\frac{R_4(R_5+R_6)}{R_4+R_5+R_6}=\frac{1.0k\Omega\times 1.07k\Omega}{2.07k\Omega}=517\Omega$$

第二步：画出等效电路如图 6-21 所示，总电路电阻为

$$R_T=R_{AB}+R_3+R_{CD}=2.15k\Omega+1.0k\Omega+517\Omega=3.67k\Omega$$

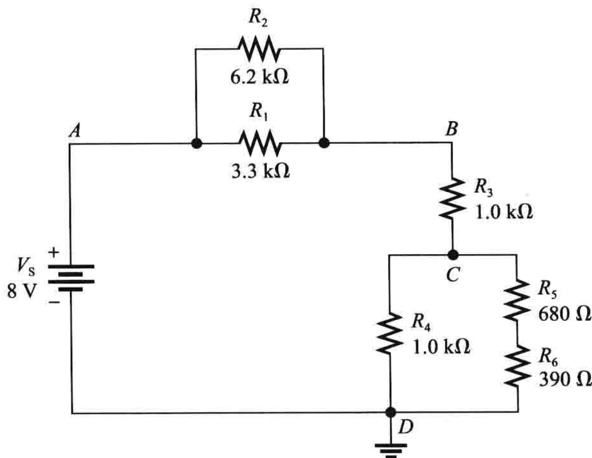


图 6-20

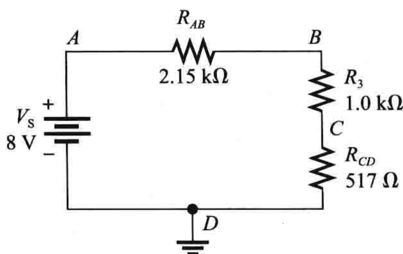


图 6-21

第三步：利用分压公式求等效串联电路的电压。

$$V_{AB}=\left(\frac{R_{AB}}{R_T}\right)V_S=\frac{2.15k\Omega}{3.67k\Omega}\times 8V=4.69V$$

$$V_{BC}=\left(\frac{R_3}{R_T}\right)V_S=\frac{1.0k\Omega}{3.67k\Omega}\times 8V=2.18V$$

$$V_{CD}=\left(\frac{R_{CD}}{R_T}\right)V_S=\frac{517\Omega}{3.67k\Omega}\times 8V=1.13V$$

参考图 6-20，V_{AB} 等于 R_1 和 R_2 两端的电压。

$$V_{R1}=V_{R2}=V_{AB}=4.69\text{V}$$

V_{BC}是R_3两端的电压。

$$V_{R3}=V_{BC}=2.18\text{V}$$

V_{CD}是R_4两端的电压，也是R_5和R_6串联组合两端的电压。

$$V_{R4}=V_{CD}=1.13\text{V}$$

第四步：应用分压公式于R_5和R_6的串联组合，得到V_{R5}和V_{R6}。

$$V_{R5}=\left(\frac{R_5}{R_5+R_6}\right)V_{CD}=\frac{680\Omega}{1070\Omega}\times 1.13\text{V}=718\text{mV}$$

$$V_{R6}=\left(\frac{R_6}{R_5+R_6}\right)V_{CD}=\frac{390\Omega}{1070\Omega}\times 1.13\text{V}=412\text{mV}$$

相关问题：试确定图 6-20 中各个电阻的电流与功率。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E06-09，测量每个电阻的电压并与计算值比较。如果R_4增至 2.2kΩ，请指出哪个电压增大、哪个电压下降，通过测量进行验证。

本节测试题

1. 求图 6-22 所示的电路中 A、B 之间的总电阻。
2. 求图 6-22 中流过R_3的电流。
3. 求图 6-22 中的V_{R2}。
4. 确定图 6-23 中的R_T和I_T。

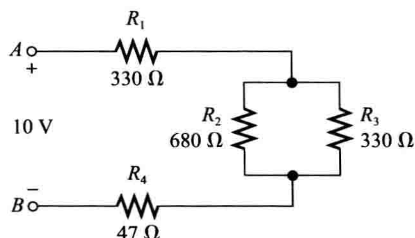


图　6-22

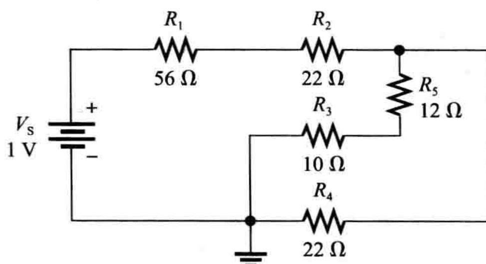


图　6-23

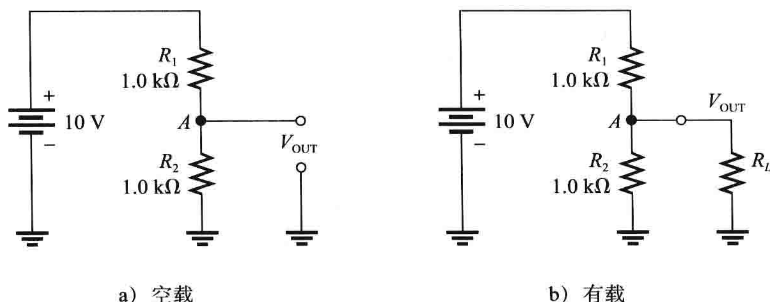
6.3　带电阻负载的分压器

第 4 章介绍了分压器，本节将学习分压器电路的电阻负载效应。

学习完本节内容，应该能够

- 分析带有负载的分压器；
- 确定电阻负载对分压器的效应；
- 定义泄漏电流。

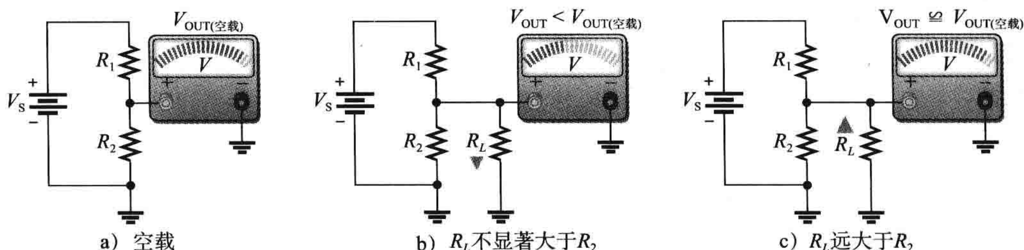
图 6-24a 的分压器输入为 10V，两个电阻等值，因此，产生 5V 的输出电压（V_{OUT}），这是不带负载的输出电压。当负载电阻R_L接在输出端与接地端之间时，如图 6-24b 所示，输出电压将根据R_L的值而降低，这种效应称为加载（loading）。负载电阻与R_2并联，从而减小了从节点 A 到接地端的电阻，结果也减小了这个并联组合两端的电压，这是加载分压器的一个效应。由于电路的总电阻降低，所以另一个负载效应是增大了电源流出的电流。



a）空载　　b）有载

图 6-24 空载与有载分压器的输出

在为分压器选择电阻时，考虑分压器的负载效应非常重要。当R_L远大于分压器电阻时，加载效应很小，输出电压与空载情况相比只有少量变化。加载效应很小的分压器称为刚性分压器，这个术语是相对的，通常是指空载和有载输出电压之间的差异很小。一般来说，刚性分压器的负载电阻比分压器电阻至少大10倍。刚性分压器虽然更稳定，但却要消耗更多能量，因此选择分压电阻要在两个参数之间做折中。图6-25显示了负载电阻对输出电压的影响。



a）空载　　b）R_L不显著大于R_2　　c）R_L远大于R_2

图 6-25 负载电阻效应，c）图电路显示了刚性分压器

【例 6-10】 (a) 试确定图6-26中分压器的空载输出电压。

(b) 在图6-26所示的分压器中，对于下列负载电阻求有载输出电压：$R_L=10\text{k}\Omega$，$R_L=100\text{k}\Omega$。

解：(a) 空载输出电压为

$$V_{\text{OUT(空载)}}=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_S=\frac{10\text{k}\Omega}{14.7\text{k}\Omega}\times 5\text{V}=3.40\text{V}$$

(b) 接10kΩ负载电阻，R_L与R_2并联，得

$$R_2 \parallel R_L=\frac{R_2R_L}{R_2+R_L}=\frac{10\text{k}\Omega\times 10\text{k}\Omega}{20\text{k}\Omega}=5.0\text{k}\Omega$$

等效电路如图6-27 (a) 所示。有载输出电压为

$$V_{\text{OUT(有载)}}=\left(\frac{R_2 \parallel R_L}{R_1+R_2 \parallel R_L}\right)V_S=\frac{5.0\text{k}\Omega}{9.7\text{k}\Omega}\times 5\text{V}=2.58\text{V}$$

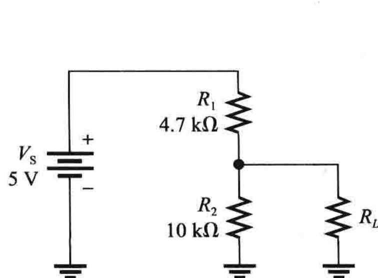
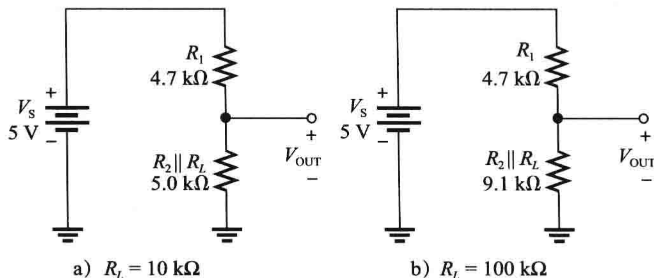


图 6-26



a）$R_L=10\text{ k}\Omega$　　b）$R_L=100\text{ k}\Omega$

图 6-27

接 100kΩ 负载电阻，输出到接地端电阻为

$$R_2 \parallel R_L = \frac{R_2 R_L}{R_2 + R_L} = \frac{10\text{k}\Omega \times 100\text{k}\Omega}{110\text{k}\Omega} = 9.1\text{k}\Omega$$

等效电路如图 6-27b 所示。有载输出电压为

$$V_{\text{OUT(有载)}} = \left(\frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + R_2 \parallel R_L}\right) V_S = \frac{9.1\text{k}\Omega}{13.8\text{k}\Omega} \times 5\text{V} = 3.30\text{V}$$

对于较小的 R_L 值，V_{OUT}减小为

$$3.40\text{V} - 2.58\text{V} = 0.82\text{V}\ (\text{输出电压减小 }24\%)$$

对于较大的 R_L 值，V_{OUT}减小为

$$3.40\text{V} - 3.30\text{V} = 0.10\text{V}\ (\text{输出电压减小 }3\%)$$

这说明了 R_L 对分压器的加载效应。

相关问题：试确定负载电阻为 1.0MΩ 时图 6-26 中的 V_{OUT}。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E06-10，测量输出端对接地端的电压，在输出端到接地端之间接 10kΩ 负载电阻并测量输出电压，把负载电阻改为 100kΩ 并测量输出电压，这些测量值与计算值接近吗？

负载电流和泄漏电流

在多抽头加载的分压器电路中，从电源吸取的总电流包括通过所谓流过各负载电阻的电流称为负载电流，还包括流过分压电阻的电流。图 6-28 显示了具有两个电压输出或抽头的分压器。注意，总电流 I_T流过 R_1，总电流包含两个分支电流 I_{RL1}和 I_2，电流 I_2又包含两个分支电流 I_{RL2}和 I_3。电流 I_3称为泄漏电流，这是从电路总电流中减去总负载电流剩下的电流。

$$I_{\text{泄漏}} = I_T - I_{RL1} - I_{RL2} \qquad (6\text{-}1)$$

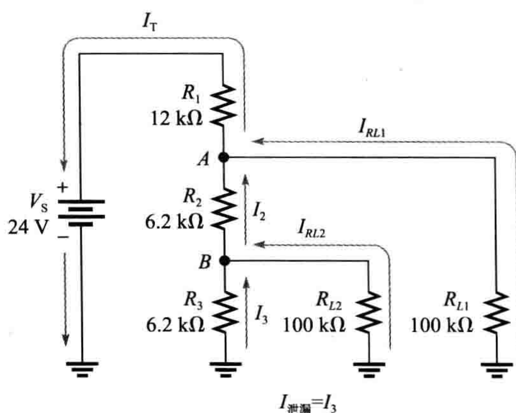


图 6-28　两抽头有载分压器的电流

【例 6-11】　试确定图 6-28 所示的两抽头有载分压器中负载电流 I_{RL1}和 I_{RL2}以及泄漏电流 I_3。

解： 从节点 A 到接地端的等效电阻为：R_3与 R_{L2}并联，然后与 R_2串联，再与 100kΩ 负载电阻 R_{L1}并联。首先确定 R_3与 R_{L2}并联的电阻值，记为 R_B，等效电路如图 6-29a 所示。

$$R_B = \frac{R_3 R_{L2}}{R_3 + R_{L2}} = \frac{6.2\text{k}\Omega \times 100\text{k}\Omega}{106.2\text{k}\Omega} = 5.84\text{k}\Omega$$

R_2与 R_B串联记为 R_{2+B}，结果等效电路如图 6-29b 所示。

$$R_{2+B} = R_2 + R_B = 6.2\text{k}\Omega + 5.84\text{k}\Omega = 12.0\text{k}\Omega$$

R_{L1}与 R_{2+B}并联记为 R_A，结果等效电路如图 6-29c 所示。

$$R_A = \frac{R_{L1} R_{2+B}}{R_{L1} + R_{2+B}} = \frac{100\text{k}\Omega \times 12.0\text{k}\Omega}{112\text{k}\Omega} = 10.7\text{k}\Omega$$

R_A是节点 A 到接地端的总电阻，而电路的总电阻为

$$R_T = R_A + R_1 = 10.7\text{k}\Omega + 12\text{k}\Omega = 22.7\text{k}\Omega$$

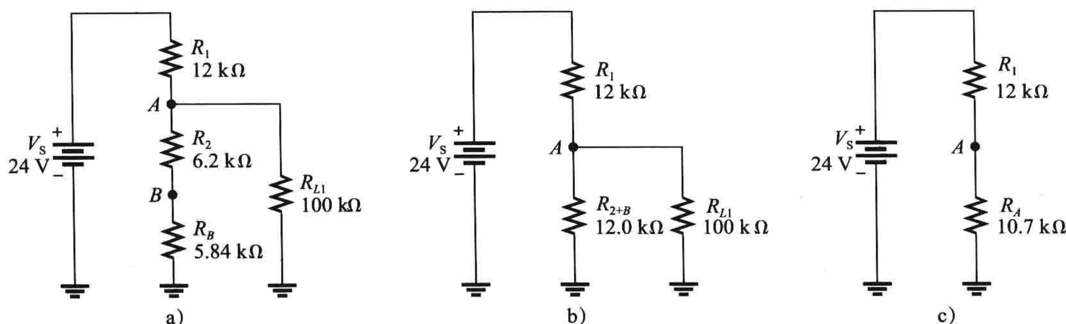


图 6-29

确定 R_{L1} 两端的电压如下，利用图 6-29c 的等效电路

$$V_{RL1}=V_A=\left(\frac{R_A}{R_T}\right)V_S=\frac{10.7\text{k}\Omega}{22.7\text{k}\Omega}\times 24\text{V}=11.3\text{V}$$

流过 R_{L1} 的负载电流为

$$I_{RL1}=\frac{V_{RL1}}{R_{L1}}=\frac{11.3\text{V}}{100\text{k}\Omega}=113\mu\text{A}$$

利用图 6-29a 的等效电路和节点 A 的电压来确定节点 B 的电压。

$$V_B=\left(\frac{R_B}{R_{2+B}}\right)V_A=\frac{5.84\text{k}\Omega}{12.0\text{k}\Omega}\times 11.3\text{V}=5.50\text{V}$$

流过 R_{L2} 的负载电流为

$$I_{RL2}=\frac{V_{RL2}}{R_{L2}}=\frac{V_B}{R_{L2}}=\frac{5.50\text{V}}{100\text{k}\Omega}=55\mu\text{A}$$

泄漏电流为

$$I_3=\frac{V_B}{R_3}=\frac{5.50\text{V}}{6.2\text{k}\Omega}=887\mu\text{A}$$

相关问题：如果不接 R_{L1}，试问 R_{L2} 中的负载电流将如何变化？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E06-11，测量负载电阻 R_{L1} 和 R_{L2} 两端的电压以及流过的电流。

系统举例 6-1　带分压偏置的分立放大器

放大器是电子系统的基础，许多其他电路都是从放大器建立起来的。由于双极性晶体管的线性特性，因此它常常被选择用来在线性电路中构造放大器。对于小信号双极性晶体管放大器，为了使晶体管处于放大状态，通常使用分压器建立合适的直流条件（称为偏置）。图 6-30 显示了一个简化的双极性晶体管电压放大器。晶体管的工作需要一定量的基极电流，这由 R_1 和 R_2 组成的分压器偏置网络建立。在由分压器建立偏置的放大器中，基极电流一般设计得比泄漏电流小很多（<10%），满足这个条件时，基极电压的计算很简单，只要简单地应用已经学过的空载分压准则，在原公式中用 V_{CC} 替代电源电压 V_S：

$$V_{BASE}=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_{CC}=\frac{4.7\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega+4.7\text{k}\Omega}\times 12\text{V}=3.84\text{V}$$

该电路的实际偏置电压为 3.7V，可以看出负载效应很小。

图 6-31 显示了另一个分压偏置的例子，但是这里负载是扬声器，而放大器则是一个功率放大器。用于功率放大器的分压器通常与一般分压器取值不同，主要取决于放大器的种类和正常工作所需的偏置电流，如果需要大的偏置电流，则偏置电阻就会比较小。空载分压的简化假设可应用于任何基极电流远小于泄漏电流的场合，这样估计出的基极电压才是合理的。

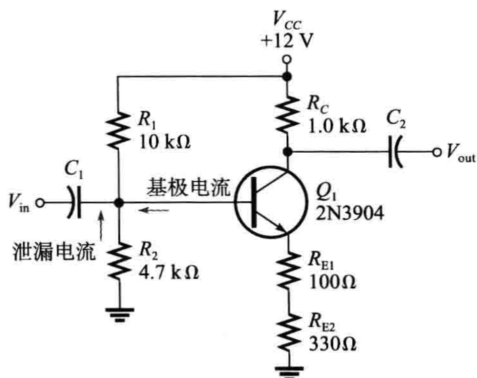


图 6-30　电压放大器

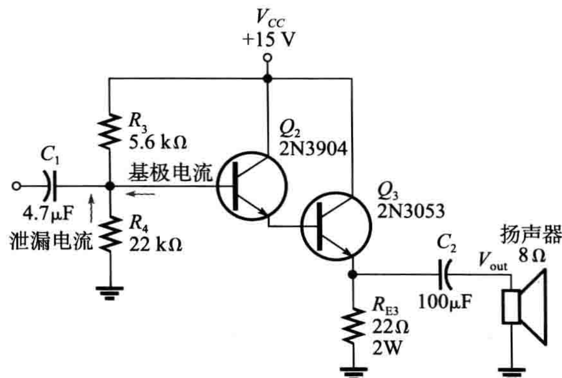


图 6-31　功率放大器

本节测试题

1. 负载电阻接到分压器输出端，试问负载电阻对输出电压有何影响？
2. 大阻值负载电阻对分压器输出电压产生的变化没有小阻值负载电阻产生的大（T 或 F）。
3. 对于图 6-32 所示的分压器，试求其空载输出电压。若在输出端与接地端之间接 10MΩ 负载电阻，再求输出电压。

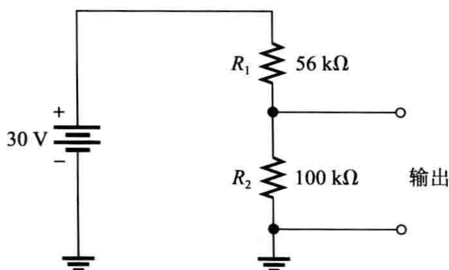


图　6-32

6.4　电压表的负载效应

我们已学过，电压表必须与电阻并联连接才能测量其两端的电压，由于电压表及其他测量仪器的内阻存在，会给电路附加一个负载，将一定程度地影响电压的测量值。到目前为止，我们都忽略了负载效应，因为电压表的内阻非常高，通常对被测电路的影响可以忽略不计。然而，如果电压表内阻并不远远大于被测电路的电阻，那么负载效应将导致所测量的电压小于其实际值。

学习完本节内容，应该能够

- 确定电压表对电路的负载效应；
- 解释为什么电压表会对电路形成负载；
- 讨论电压表的内阻。

例如，当电压表如图 6-33a 所示接入电路时，其内阻与 R_3 并联，如图 6-33b 所示，则从 A 到 B 的电阻将由于电压表内阻 R_M 的负载效应而变为 $R_3 \| R_M$，如图 6-33c 所示。

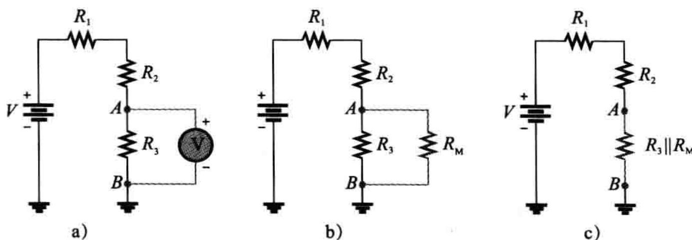


图 6-33　电压表的负载效应

如果R_M远大于R_3，则从A到B的电阻变化很小，电压表读数非常接近无电表连接时的实际值，如果R_M不是远大于R_3，则从A到B的电阻减小明显，电压表负载效应导致R_3两端电压改变。进行故障排除的经验法则是：如果电表内阻至少十倍于其所跨接电路两端的电阻，则负载效应可以忽略（测量误差小于10%）。

大多数电压表是多功能仪器的一个部分，如2.7节介绍的DMM或模拟万用表。DMM中的电压表典型内阻为10MΩ以上，因此只有对非常高电阻的电路负载效应才显得重要。因为输入端接有一个固定的内部分压器，所以DMM在所有量程都有一恒定的电阻。对于模拟万用表，其内阻取决于测量所选择的量程。为了确定负载效应，必须知道电表的*灵敏度*，该值由电表制造商在表上或手册上给出。灵敏度以欧姆/伏特表示，典型值为20 000Ω/V。为了确定内部串联电阻，可用所选量程的最大电压乘以灵敏度，例如，20 000Ω/V的电表在1V量程的内阻为20 000Ω，而在10V量程的内阻则是200 000Ω。可以看出，模拟万用表的高电压量程比低电压量程负载效应小。

【例6-12】　试问图6-34所示的各电路中数字电压表对被测电压的影响有多大？假设电表输入电阻（R_M）为10MΩ。

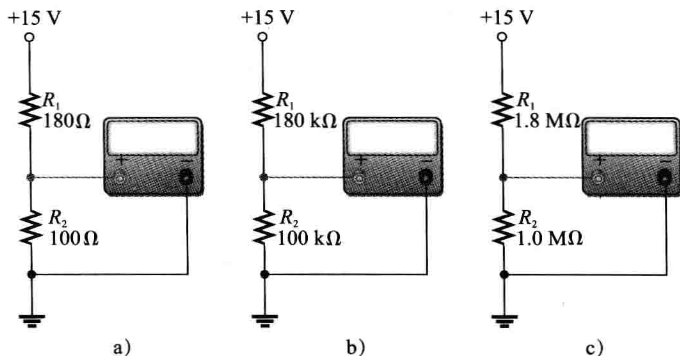


图　6-34

解：为清楚显示微小差别，本例中的结果用三位以上有效数字表示。

(a) 对于图6-34a，分压器电路中R_2两端的空载电压为

$$V_{R2}=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_S=\frac{100\Omega}{280\Omega}\times 15\text{V}=5.357\text{V}$$

电表电阻与R_2并联为

$$R_2 \parallel R_M=\left(\frac{R_2R_M}{R_2+R_M}\right)=\frac{100\Omega\times 10\text{M}\Omega}{10.0001\text{M}\Omega}=99.999\Omega$$

电表实际测得电压为

$$V_{R2}=\left(\frac{R_2 \parallel R_M}{R_1+R_2 \parallel R_M}\right)V_S=\frac{99.999\Omega}{279.999\Omega}\times 15\text{V}=5.357\text{V}$$

电表没有产生可测量的负载效应。

(b) 对于图6-34b，

$$V_{R2}=\left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)V_S=\frac{100\text{k}\Omega}{280\text{k}\Omega}\times 15\text{V}=5.357\text{V}$$

$$R_2 \parallel R_M=\left(\frac{R_2R_M}{R_2+R_M}\right)=\frac{100\text{k}\Omega\times 10\text{M}\Omega}{10.1\text{M}\Omega}=99.01\text{k}\Omega$$

电表实际测得电压为

$$V_{R2} = \left(\frac{R_2 \parallel R_M}{R_1 + R_2 \parallel R_M}\right)V_S = \frac{99.01\text{k}\Omega}{279.01\text{k}\Omega} \times 15\text{V} = 5.323\text{V}$$

电表负载效应使电压有一个较小的减小。

(c) 对于图 6-34c，

$$V_{R2} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)V_S = \frac{1.0\text{M}\Omega}{2.8\text{M}\Omega} \times 15\text{V} = 5.357\text{V}$$

$$R_2 \parallel R_M = \left(\frac{R_2 R_M}{R_2 + R_M}\right) = \frac{1.0\text{M}\Omega \times 10\text{M}\Omega}{11\text{M}\Omega} = 909.09\text{k}\Omega$$

实际测得电压为

$$V_{R2} = \left(\frac{R_2 \parallel R_M}{R_1 + R_2 \parallel R_M}\right)V_S = \frac{909.09\text{k}\Omega}{2.709\text{M}\Omega} \times 15\text{V} = 5.034\text{V}$$

电表负载效应使电压的减小明显。可以看出，被测电压两端的电阻越高，负载效应越大。

相关问题：如果电表电阻为 20MΩ，试计算图 6-34c 中 R_2 两端的电压。

本节测试题

1. 试解释为什么电压表会对电路造成隐性负载。
2. 如果用内阻为 10MΩ 的电压表测量 1.0kΩ 电阻两端的电压，通常会考虑负载效应吗？
3. 如果用内阻为 10MΩ 的电压表测量 3.3MΩ 电阻两端的电压，是否应该考虑负载效应？
4. 模拟万用表的电压表灵敏度为20 000Ω/V，试问在 200V 量程时的串联内阻为多大？

6.5 惠斯通电桥

惠斯通电桥电路可用于精确测量电阻，然而，电桥更常用于利用传感器对应变、温度和压力等物理量进行测量的自动化电路。传感器是一种感测物理参数变化并将这种变化转换成电阻等电参量变化的装置。例如，当感受到力、压力或位移等机械因素作用时，应变计的电阻产生相应变化；再如，当感受到温度变化时，热敏电阻的电阻发生相应变化。惠斯通电桥可以工作在平衡或不平衡条件下，其工作条件取决于应用的类型。

学习完本节内容，应该能够

- 分析与应用惠斯通电桥；
- 确定何时电桥平衡；
- 利用平衡电桥确定未知电阻；
- 确定电桥何时不平衡；
- 讨论使用不平衡电桥进行测量。

惠斯通电桥电路最常见的菱形结构如图 6-35a 所示，由四个电阻和一个跨接在菱形顶部和底部两点之间的直流电压源组成。输出电压取自菱形的左侧与右侧两点 A 和 B 之间，该电路可以绘制成另一个稍微不同的方式，以便清楚地显示其串并联结构。

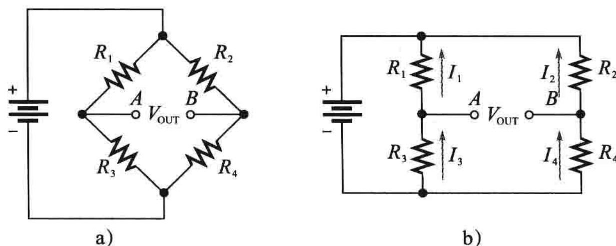


图 6-35 惠斯通电桥，注意电桥形成两个背对背的分压器

6.5.1 平衡惠斯通电桥

当图6-35所示的惠斯通电桥 A、B 端之间的输出电压（V_{OUT}）等于零时，该电桥处于平衡电桥条件下。

$$V_{OUT} = 0V$$

电桥平衡时，R_1和R_2两端电压相等（$V_1 = V_2$），R_3和R_4两端电压也相等（$V_3 = V_4$），因此，电压比可写成

$$\frac{V_1}{V_3} = \frac{V_2}{V_4}$$

根据欧姆定律，用 IR 替代 V，得到

$$\frac{I_1R_1}{I_3R_3} = \frac{I_2R_2}{I_4R_4}$$

因为 $I_1 = I_3$、$I_2 = I_4$，上式中所有电流项消去，剩下电阻比

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$$

解 R_1得到下面的公式：

$$R_1 = R_3\left(\frac{R_2}{R_4}\right)$$

这一公式让我们在电桥平衡时借助于其他电阻求电阻 R_1的值，也可用同样的方法求其他电阻的值。

利用平衡惠斯通电桥求解未知电阻 在图6-35中，假设 R_1的值未知，称为 R_X，电阻 R_2和 R_4为固定电阻，因此它们的比值 R_2/R_4数值固定。由于 R_X的数值任意，为了达到平衡条件，必须调节 R_3使得 $R_1/R_3 = R_2/R_4$。因此，R_3是一个可调电阻，称为 R_V。当 R_X接入电桥时，调节 R_V直至零输出电压指示的电桥平衡，则可求得未知电阻为

$$R_X = R_V\left(\frac{R_2}{R_4}\right) \tag{6-2}$$

比值 R_2/R_4为比例因子。

一种称为检流计的老式测量仪器接在输出端 A 与 B 之间，用于检测平衡条件。检流计本质上是一种非常敏感的电流表，能感测任一方向的电流，它与普通电表的不同是中间点值是零。现在大部分惠斯通电桥都是自动化的，在电桥输出端跨接放大器，输出为0V时指示电桥平衡状态。此外，高精度微调电阻器可用于要求严格的应用中，微调电阻使得在制造诸如医疗传感器、电子秤和精密测量时能对电桥的电阻进行精细调节。

从公式（6-2）可知，平衡条件下 R_V的值乘以比例因子 R_2/R_4就是 R_X的实际电阻值。如果 $R_2/R_4 = 1$，那么 $R_X = R_V$；如果 $R_2/R_4 = 0.5$，那么 $R_X = 0.5R_V$，以此类推。在实际电桥电路中，R_V的调节位置能够校准成直接或其他显示方式指示 R_X的值。

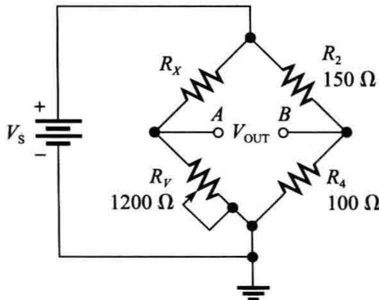


图 6-36

【例6-13】 试确定图6-36所示平衡电桥中 R_X的值，当 R_V置于1200Ω时电桥平衡($V_{OUT} = 0$)。

解： 比例因子为

$$\frac{R_2}{R_4} = \frac{150\Omega}{100\Omega} = 1.5$$

未知电阻为

$$R_X = R_V\left(\frac{R_2}{R_4}\right) = 1200\Omega \times 1.5 = 1800\Omega$$

相关问题：如果在图 6-36 中 R_V必须调到 2.2kΩ 电桥才平衡，试问 R_X为多少？

6.5.2　不平衡惠斯通电桥

不平衡电桥条件发生在输出电压 V_{OUT}不等于零时。不平衡电桥用于测量诸如机械应变、温度或压力等多种类型的物理量。在一条桥臂上连接传感器，如图 6-37 所示。传感器电阻的变化与被测参数变化成比例，如果电桥在一个已知点平衡，则输出电压表示了偏离平衡状态的偏差量，即表示了被测参数的变化量。因此，可以通过电桥的不平衡量来确定被测参数的值。

测量温度的电桥电路　如果要测量温度，传感器可使用热敏电阻，它是一个对温度敏感的电阻。热敏电阻的阻值随着温度的变化以一种可预测的方式变化。温度变化引起热敏电阻阻值的变化，从而导致电桥不平衡引起输出电压的相应变化。输出电压与温度成比例，因此，可以把跨接在输出端的电压表校准得显示温度，或者把输出电压放大并转换成数字形式以驱动温度读出显示。

用于测量温度的电桥电路设计成在参考温度时平衡，而在测量温度时不平衡。例如，说电桥在 25℃平衡，热敏电阻在 25℃将具有已知的值。

【例 6-14】　如果热敏电阻置于 50℃环境，而它在 25℃时阻值为 1.0kΩ，试确定图 6-38 所示的温度测量电桥电路的输出电压，假设热敏电阻的阻值在 50℃时降为 900Ω。

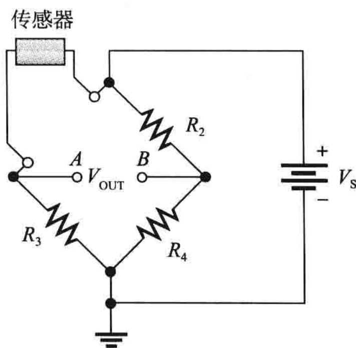


图 6-37　用传感器测量物理参数的电桥电路

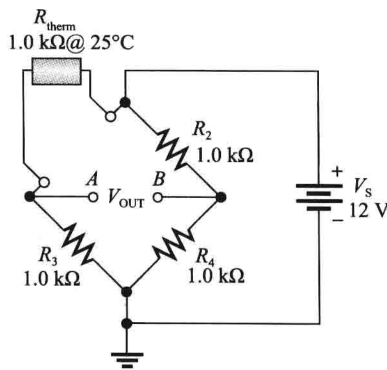


图　6-38

解： 在 50℃时对电桥的左侧应用分压公式。

$$V_A = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_{therm}}\right)V_S = \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 900\Omega} \times 12V = 6.32V$$

对电桥的右侧应用分压公式。

$$V_B = \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4}\right)V_S = \frac{1k\Omega}{2k\Omega} \times 12V = 6.00V$$

50℃时输出电压是 V_A与 V_B之差。

$$V_{OUT} = V_A - V_B = 6.32V - 6.00V = 0.32V$$

节点 A 相对于节点 B 为正。

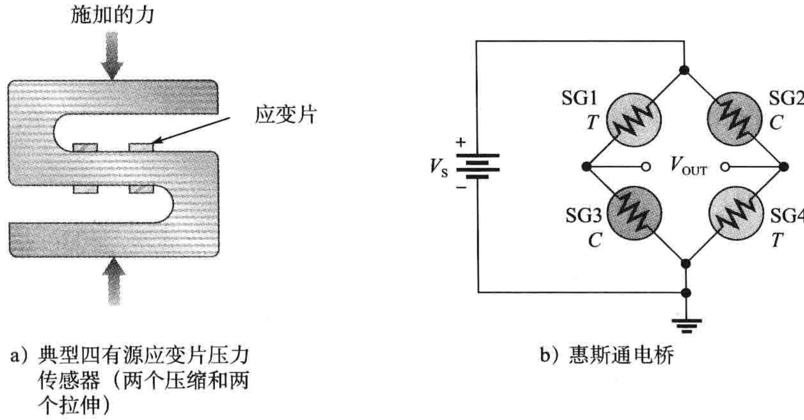
相关问题：如果温度升高到 60℃，导致图 6-38 中热敏电阻降至 850Ω，试问 V_{OUT}为多大？

惠斯通电桥的应变计应用　带有应变计的惠斯通电桥可用于测量力，当施加到应变计的外

力使之被压缩或拉伸时，应变计的电阻发生相应变化，随着应变计电阻的变化，原先平衡的电桥变得不平衡，不平衡引起输出电压偏离零，这一变化能够被测量出来并以此确定应变量。在应变计中电阻的变化非常小，因为惠斯通电桥的高灵敏度，这个微小变化就能使电桥不平衡并且可以检测。例如，带应变计的惠斯通电桥常用在体重秤中。

某些电阻传感器电阻变化非常小，这些变化很难用直接的测量方法进行准确测量。特别地，应变计是一种最常用的电阻传感器，它把细金属丝的拉伸或压缩转换成电阻的变化，当应变导致应变计的细丝拉伸时，其电阻增加一个微量，而压缩时细丝电阻降低。

应变计被用于从称量小零件到称重大卡车的多种类型的秤中。通常，应变计安装在一个特殊的铝块上，秤重时发生变形。应变计非常娇嫩，必须正确安装，所以整个组件一般制备成单个单元，称为压力传感器。**压力传感器利用应变计将机械力转换成电信号。**各种各样具有不同形状和大小的压力传感器可根据不同应用从制造商处获得。图6-39a显示了一个典型的用于称重的具有四个应变片的S形压力传感器，安装的应变计在负载加上时两个应变片拉伸，另两个应变片压缩。



a）典型四有源应变片压力传感器（两个压缩和两个拉伸）

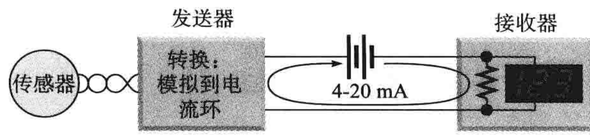
b）惠斯通电桥

图6-39 压力传感器举例

系统注释 4-20mA电流环

许多系统使用包括应变计和压力传感器之类的传感器，这类传感器信号电平很小，很容易被干扰，信号调理是一个将信号转换到可用电平的过程，避免受噪声干扰。通常情况下，将信号从模拟信号转换为数字信号。

如方框图所示的2-40mA电流环是一个老的但广泛使用的在工业环境中发送信息的标准，在长距离传输信息（1000in以上）时特别有用。传感器的输出被转换为一个信号，从最低水平4mA到最高水平20mA。由于发信方式是电流而不是电压，因此不需要考虑导线电阻，只要发送器能够克服线上电压降。该方法的主要优点是几乎不拾取噪声。



压力传感器通常连接到惠斯通电桥，如图6-39b所示，张力（T）应变片（SG）和压缩（C）应变片（SG）分别接成电桥的两个对角桥臂。通常将电桥输出数字化，并转换成用于显示的读数或发送到计算机进行处理。惠斯通电桥电路的主要优点是，能够准确地测量电阻值非

常小的差异。使用四个有源传感器增加了测量的灵敏度，并使电桥成为用于仪器的理想电路。惠斯通电桥电路还有一个额外的好处，它具有对温度变化和连线电阻的补偿作用，否则将导致测量的不准确。

除了称重，应变计还被用于惠斯通电桥的其他类型测量，包括压力测量、位移和加速度测量等。在压力测量中，应变计粘接到一柔性膜片上，膜片拉伸时压力施加到传感器。其弯曲量与压力有关，然后再转换为非常小的电阻变化。

系统举例 6-2 液位传感系统

在前面我们将压力传感器描述为力感应传感器，而重量是施加在物体上的重力，因此压力传感器被广泛应用于秤。把力转换成另一个物理量的应用是大型水箱的液体液位检测系统。筒形水箱通常使用三个压力传感器，其他形状的可能有四个压力传感器。含有有害物质或受风荷载的水箱可能会使用四个以上的压力传感器。

测量水箱液位的典型方法包括浮子、电容传感器、超声波传感器。某些液体，像油漆，属于危险液体或高温液体，使用接触式传感器有问题，所以，在这些情况下称重系统是一个有吸引力的替代。本质上，本例所描述的系统是一个通过对液体净重量的基本计算来指示液面的称重系统，由计算机把重量转换成液位指示。

图 6-40 显示了由三个压力传感器组成的液位传感器，三个压力传感器承受相同的负荷。这种方法正常工作时需要对水箱进行初始液位设定，并能够自由地上下移动。由于水箱需要在垂直方向上自由移动，因此应使用柔性接头。压力传感器禁止任何水平方向的运动，水箱在水平方向上应加以固定。水箱完全由压力传感器支撑，这样称重总和即表示总重量（水箱加液体），每个压力传感器均接入惠斯通电桥，计算机计算出水箱中液体的百分比，并显示结果。图 6-41 显示了该系统的方框图。

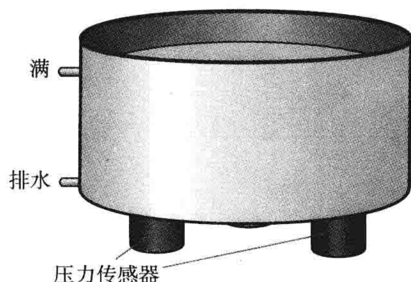


图 6-40 水箱液位传感系统

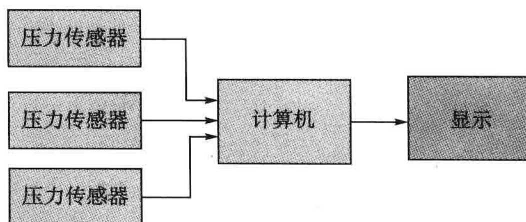


图 6-41 系统框图

本节测试题

1. 试画出基本惠斯通电桥电路。
2. 请问在什么条件下电桥平衡？
3. 当 $R_V = 3.3\text{k}\Omega$、$R_2 = 10\text{k}\Omega$、$R_4 = 2.2\text{k}\Omega$ 时，试问图 6-36 中的未知电阻为多大？
4. 试问在不平衡状态怎样使用惠斯通电桥？
5. 什么是压力传感器？

6.6 戴维南定理

戴维南定理提供了一种化简电路的方法，可将电路简化为两个输出端子的标准等效形式。许多情况下，可以使用这个定理简化串并联电路的分析。另一种简化电路为等效形式的方法是诺顿定理，该定理将在附录 C 中介绍。

学习完本节内容，应该能够

- 使用戴维南定理简化电路分析；
- 描述戴维南等效电路的形式；
- 获得戴维南等效电压源；
- 获得戴维南等效电阻；
- 说明戴维南定理背景下的端子等效；
- 戴维南化电路端口；
- 戴维南化惠斯通电桥。

任意二端电阻电路的戴维南等效由一个等效电压源（V_{TH}）和一个等效电阻（R_{TH}）构成，连接方式如图 6-42 所示。等效电压源和等效电阻的数值由原电路的参数决定，任意复杂的二端电阻电路都可以简化为戴维南等效。

等效电压 V_{TH}是戴维南等效的一部分，另一部分是等效电阻 R_{TH}。**戴维南等效电压（V_{TH}）是电路两个指定输出端之间的开路（空载）电压。**

任何连接在两个端之间的元件均有效地“看到”V_{TH}和 R_{TH}串联。正如戴维南定理指出的，**戴维南等效电阻（R_{TH}）为电路两个指定输出端之间呈现的总电阻，此时电路中所有电源均由其内阻（理想电压源为零）替代。**

虽然戴维南等效电路与原电路形式不同，但是输出电压和电流的作用却相同。考虑下面图 6-43所示的演示，将任意复杂的电阻电路放在仅露出两个输出端的盒子中，而该电路的戴维南等效电路也被放置在一个相同的盒子中，也只有输出端露出。两个盒子输出端接同样的负载电阻。接下来，用电压表和电流表分别测量负载的电压和电流，如图 6-43 所示，测量值将是相同的（忽略误差），我们无法确定哪个盒子里包含原电路哪个盒子里包含原电路的戴维南等效，也就是说，由电气测量观察到的两个电路表现相同。由于这两个电路从两个输出端的“视点”看起来是一样的，这个条件有时称为端子等价。

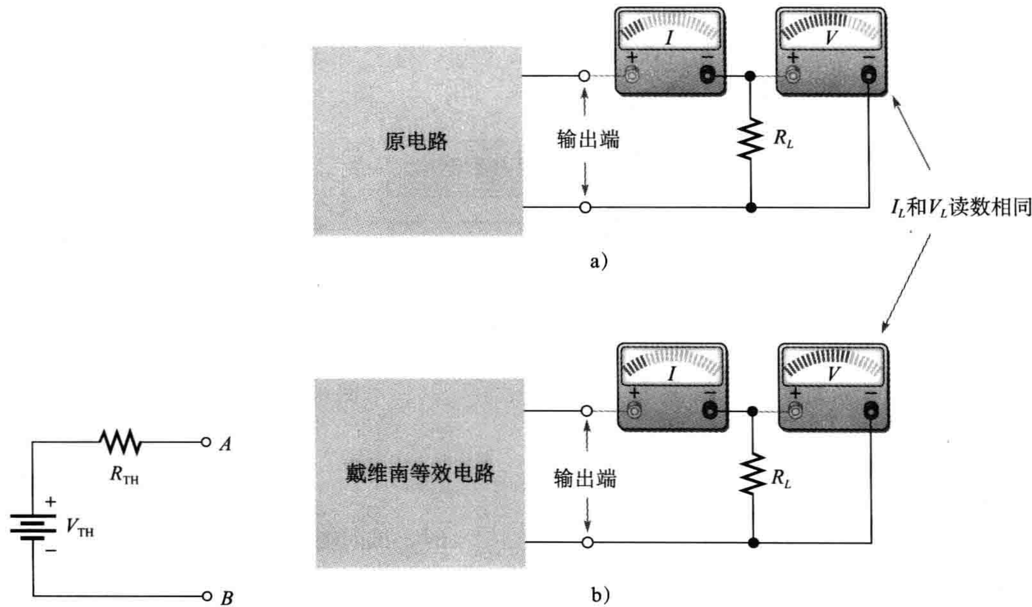


图 6-42 戴维南等效电路的一般形式为电压源与电阻串联

图 6-43 哪个盒子里包含原电路哪个盒子包含原电路的戴维南等效？由于两个电路端等价，无法通过观察电表分辨

为了找到任意电路的戴维南等效，必须确定等效电压 V_{TH}和等效电阻 R_{TH}。例如，输出端 A 和 B 之间电路的戴维南等效求解如图 6-44 所示。

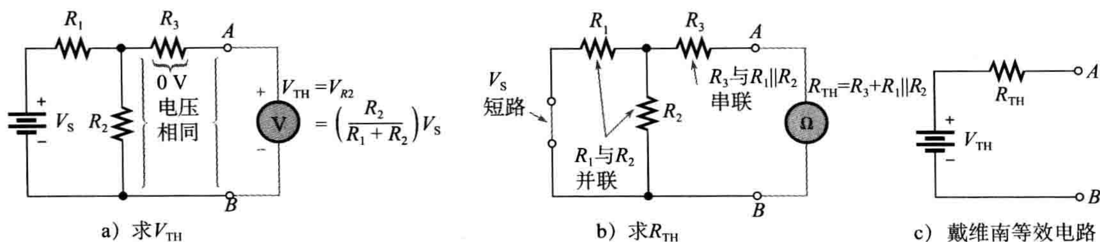


图 6-44 用戴维南定理简化电路示例

在图 6-44a 中，指定端 A 和 B 之间的电压即戴维南等效电压。在这个特定电路中，由于没有电流流过电阻 R_3，其两端电压为零，所以从 A 到 B 的电压与 R_2 两端电压相等。该例中 V_{TH} 可表示如下：

$$V_{TH} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)V_S$$

在图 6-44b 中，电源用其零内阻替代，端子 A 和 B 之间的电阻即戴维南等效电阻。在这个特定电路中，从 A 到 B 的电阻为 R_3 与 R_1 和 R_2 的并联组合串联，因此，R_{TH} 可表示如下：

$$R_{TH} = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

戴维南等效电路如图 6-44c 所示。

【例 6-15】 求图 6-45 中电路输出端 A 和 B 之间的戴维南等效电路，如果有负载电阻接在端子 A 和 B 之间，应先将其移去。

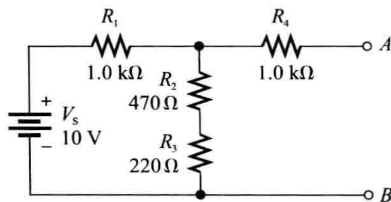


图 6-45

解： 由于 R_4 两端没有电压降，V_{AB} 等于 $R_2 + R_3$ 两端电压，$V_{TH} = V_{AB}$，如图 6-46a 所示。利用分压准则求 V_{TH}。

$$V_{TH} = \left(\frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right)V_S = \frac{690\Omega}{1.69\text{k}\Omega} \times 10\text{V} = 4.08\text{V}$$

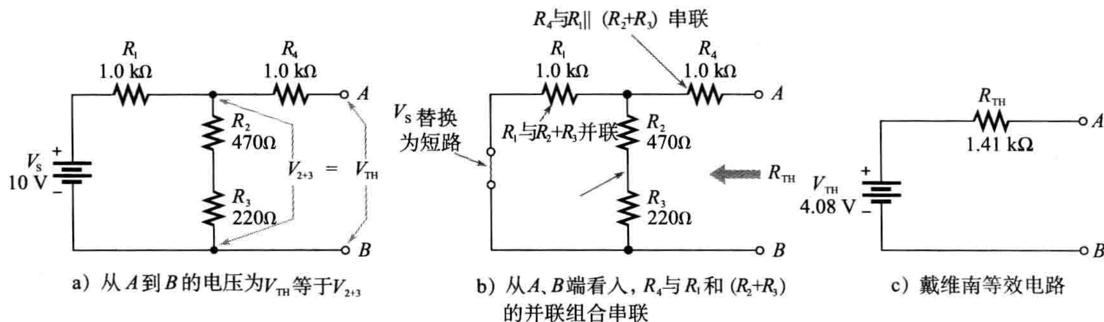


图 6-46

为求 R_{TH}，首先用短路（内阻为零）替换电源，则 R_1 与 $R_2 + R_3$ 并联，而 R_4 与 R_1、R_2、R_3 的串并联组合相串联，如图 6-46b 所示。

$$R_{TH} = R_4 + \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = 1.0\text{k}\Omega + \frac{1.0\text{k}\Omega \times 690\Omega}{1.69\text{k}\Omega} = 1.41\text{k}\Omega$$

结果戴维南等效电路如图 6-46c 所示。

相关问题：在图 6-45 中，如果 R_2 和 R_3 两端并联一个 560Ω 的电阻，试确定 V_{TH} 和 R_{TH}。

6.6.1 戴维南等效取决于观察点

任意电路的戴维南等效取决于两输出端的位置，我们从这两个端来“看”电路。在图 6-45 中，我们从标记为 A 和 B 的两个端来看电路。对于指定的输出端，任一电路都可能有多个戴维南等效。例如，如果从 A 和 C 端之间来看图 6-47 的电路，所得到的结果就与从 A、B 端或从 B、C 端来看电路得到的结果不同。



图 6-47 戴维南等效取决于观察电路的两个输出端

在图 6-48a 中，当我们从 A 和 C 端来观察时，V_{TH} 是 R_2+R_3 两端的电压，可用分压公式表示为

$$V_{TH(AC)}=\left(\frac{R_2+R_3}{R_1+R_2+R_3}\right)V_S$$

同样，如图 6-48b 所示，A 和 C 端之间的电阻为 R_2+R_3 与 R_1 并联（电源用短路替代），可表示为

$$R_{TH(AC)}=R_1 \parallel (R_2+R_3)=\frac{R_1(R_2+R_3)}{R_1+R_2+R_3}$$

结果戴维南等效电路如图 6-48c 所示。

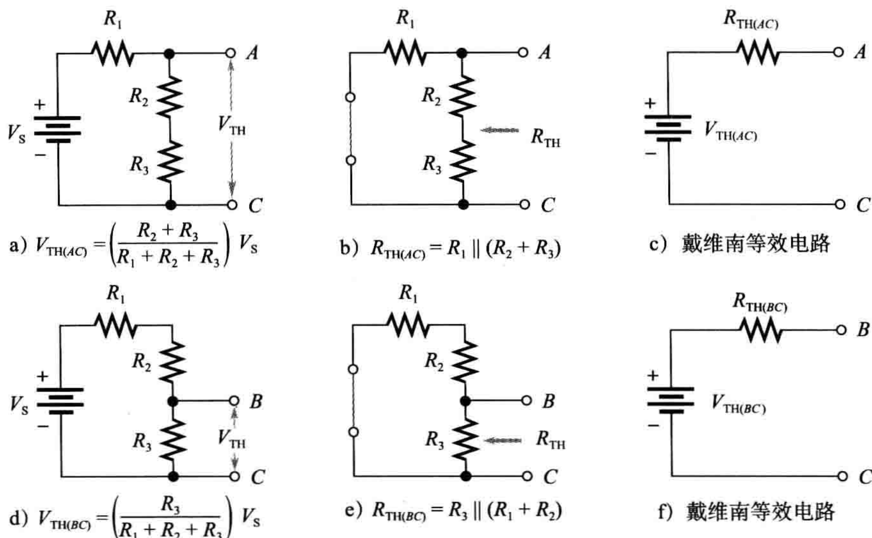


图 6-48 从不同端对戴维南化电路示例。图 a、图 b、图 c 显示了一对端子，图 d、图 e、图 f 显示了另一对端子（每种情况的 V_{TH} 和 R_{TH} 都不同）

当我们从图 6-48d 的 B 和 C 端之间观察，$V_{TH(AC)}$ 为 R_3 两端的电压，可表示为

$$V_{TH(BC)}=\left(\frac{R_3}{R_1+R_2+R_3}\right)V_S$$

如图 6-48e 所示，B 和 C 端之间的电阻为 R_3 与 R_1 和 R_2 的串联组合并联。

$$R_{TH(BC)}=R_3 \parallel (R_1+R_2)=\frac{R_3(R_1+R_2)}{R_1+R_2+R_3}$$

结果戴维南等效电路如图 6-48f 所示。

【例 6-16】　(a) 试确定从 A 和 C 端观察图 6-49 所示电路的戴维南等效电路。(b) 试确定从 B 和 C 端观察图 6-49 所示电路的戴维南等效电路。

解: (a)

$$V_{TH(AC)}=\left(\frac{R_2+R_3}{R_1+R_2+R_3}\right)V_S=\frac{4.7k\Omega+3.3k\Omega}{5.6k\Omega+4.7k\Omega+3.3k\Omega}\times 10V=5.88V$$

$$R_{TH(AC)}=R_1 \parallel (R_2+R_3)=5.6k\Omega \parallel (4.7k\Omega+3.3k\Omega)=3.29k\Omega$$

戴维南等效电路如图 6-50a 所示。

(b)

$$V_{TH(BC)}=\left(\frac{R_3}{R_1+R_2+R_3}\right)V_S=\frac{3.3k\Omega}{5.6k\Omega+4.7k\Omega+3.3k\Omega}\times 10V=2.43V$$

$$R_{TH(BC)}=R_3 \parallel (R_1+R_2)=3.3k\Omega \parallel (5.6k\Omega+4.7k\Omega)=2.5k\Omega$$

戴维南等效电路如图 6-50b 所示。

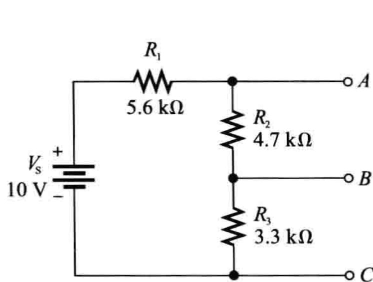


图　6-49

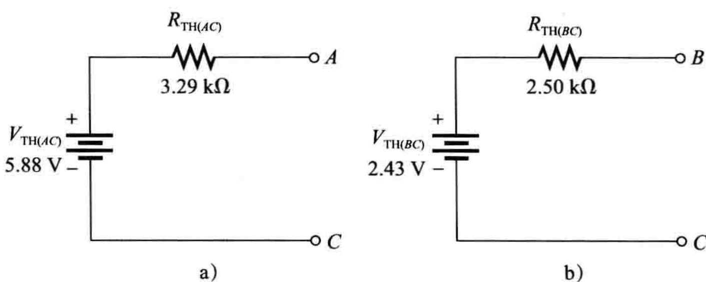


图　6-50

相关问题：试确定从 A 和 B 端观察图 6-49 所示电路的戴维南等效电路。

6.6.2　戴维南化电桥电路

将戴维南定理应用到惠斯通电桥电路可以凸显其利用价值。考虑有负载电阻接在惠斯通电桥输出端的情况，如图 6-51 所示。当负载电阻接到输出端 A 和 B 之间时，无法再直接利用串并联关系，因此，分析起来很困难。电路中电阻既不是串联也不是并联。

利用戴维南定理，可以将电桥电路简化为从负载电阻观察的等效电路，图 6-52 一步一步显示了简化步骤，应认真学习其中的步骤。一旦找到了电桥电路的等效电路，对于任意负载电阻的电压和电流都能由欧姆定律轻易求得。

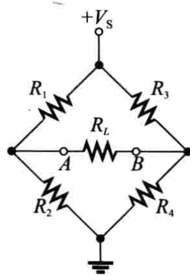


图 6-51　输出端接负载电阻的惠斯通电桥不是明确的串并联电路

【例 6-17】　试确定图 6-53 所示的电桥电路中负载电阻 R_L 的电压和电流。

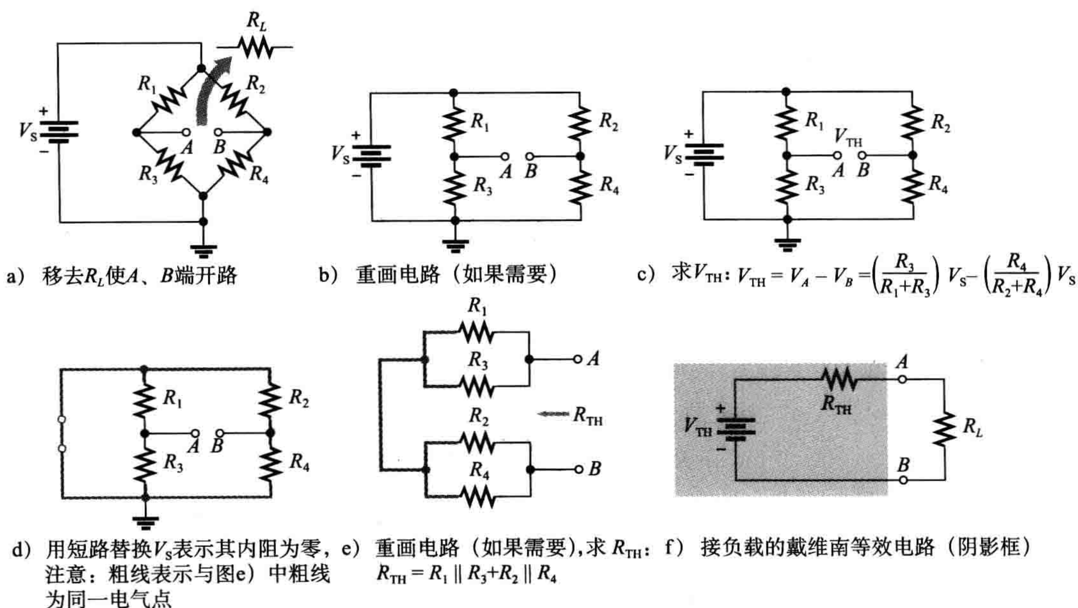
解: 第一步：移去 R_L 使 A、B 端之间开路。

第二步：从 A、B 端观察，对电桥戴维南化，如图 6-52 所示，首先确定 V_{TH}。

$$V_{TH}=V_A-V_B=\left(\frac{R_3}{R_1+R_3}\right)V_S-\left(\frac{R_4}{R_2+R_4}\right)V_S$$

$$=\frac{680\Omega}{1010\Omega}\times 24V-\frac{560\Omega}{1240\Omega}\times 24V=16.16V-10.84V=5.32V$$

第三步：确定 R_{TH}。



a) 移去R_L使A、B端开路　b) 重画电路（如果需要）　c) 求V_{TH}：$V_{TH}=V_A-V_B=\left(\frac{R_3}{R_1+R_3}\right)V_S-\left(\frac{R_4}{R_2+R_4}\right)V_S$

d) 用短路替换V_S表示其内阻为零，注意：粗线表示与图e）中粗线为同一电气点　e) 重画电路（如果需要），求R_{TH}：$R_{TH}=R_1\parallel R_3+R_2\parallel R_4$　f) 接负载的戴维南等效电路（阴影框）

图 6-52　用戴维南定理简化惠斯通电桥

$$R_{TH}=\frac{R_1R_3}{R_1+R_3}+\frac{R_2R_4}{R_2+R_4}$$
$$=\frac{330\Omega\times680\Omega}{1010\Omega}+\frac{680\Omega\times560\Omega}{1240\Omega}=222\Omega+307\Omega=529\Omega$$

第四步：V_{TH}和R_{TH}串联构成戴维南等效电路。

第五步：在戴维南等效电路的A、B端接上负载电阻，确定其电压和电流，如图6-54所示。

$$V_L=\left(\frac{R_L}{R_L+R_{TH}}\right)V_{TH}=\frac{1.0\text{k}\Omega}{1.529\text{k}\Omega}\times5.32\text{V}=3.48\text{V}$$
$$I_L=\frac{V_L}{R_L}=\frac{3.48\text{V}}{1.0\text{k}\Omega}=3.48\text{mA}$$

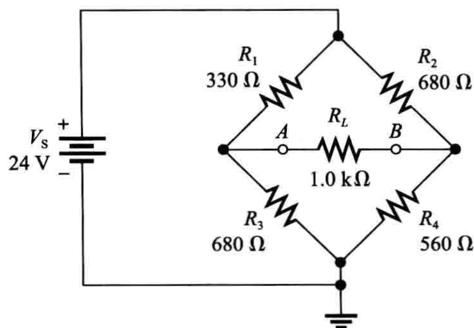


图 6-53

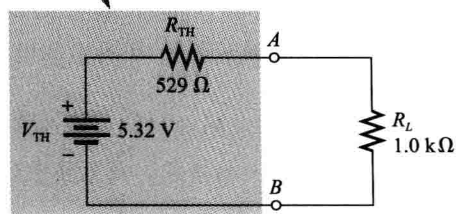


图 6-54

相关问题：在图6-53中，当$R_1=2.2\text{k}\Omega$、$R_2=3.9\text{k}\Omega$、$R_3=3.3\text{k}\Omega$、$R_4=2.7\text{k}\Omega$时计算I_L。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E06-17，用万用表确定 R_L的电压和电流，将电阻值按相关问题的要求进行修改，再测量 R_L的电压和电流。

6.6.3 戴维南定理小结

记住，不管原来电路是什么，任意电阻电路的戴维南等效电路都是一个等效电压源与一个等效电阻串联，戴维南定理的意义在于原来的电路用等效电路替换而只留下外部负载。负载电阻接在戴维南等效电路输出端之间，负载电阻两端的电压和流过的电流与接在原电路时相同。

应用戴维南定理的步骤总结如下：

第一步：将需要求戴维南等效电路的两个端子开路（移去所有负载）；

第二步：求两开路端之间的电压（V_{TH}）；

第三步：将所有电源用其内阻替代求等效电阻（R_{TH}）（理想电压源用短路替代）；

第四步：串联连接 V_{TH}和 R_{TH}构成原电路的戴维南等效；

第五步：把第一步移去的负载接到戴维南等效电路输出端，现在可以仅用欧姆定律计算负载电流和负载电压，结果与原电路的负载电流和负载电压相同。

有时也用另外两个定理分析电路：一个是诺顿定理，类似于戴维南定理，只是它采用电流源而不是电压源；另一个是弥尔曼定理，研究若干并联电压源的情况。诺顿定理和弥尔曼定理的内容见附录 C。

小贴士 可以通过测量的方法得到戴维南电阻，在电路的输出端接可调电阻，调节电阻使输出电压为开路电压的一半，现在，移走可调电阻并测量，该值等于电路的戴维南等效电阻。

本节测试题

1. 试问戴维南等效电路的两个元件是什么？
2. 试画出戴维南等效电路的一般形式。
3. 试给出 V_{TH}的定义。
4. 试给出 R_{TH}的定义。
5. 对于图 6-55 所示的原电路，从输出端 A、B 看进去求戴维南等效电路。

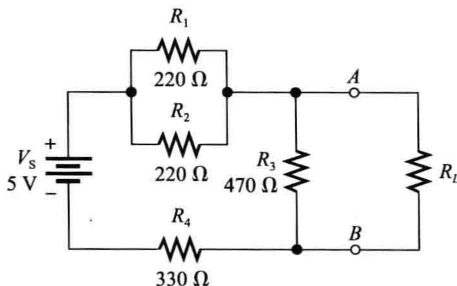


图 6-55

6.7 最大功率传输定理

最大功率传输定理说明了负载多大时能够从电源获得最大的功率。

学习完本节内容，应该能够

- 使用最大功率传输定理；
- 表述最大功率传输定理；
- 对于给定电路，确定获得最大功率的负载电阻值。

最大功率传输定理：**对于给定的电源电压，当负载电阻等于电源内阻时，从电源传输给负载的功率最大。**

一个电路的电源电阻 R_S就是用戴维南定理从输出端看进去的等效电阻，带有输出电阻和负载的戴维南等效电路如图 6-56 所示。当 $R_L=R_S$时，对于给定的 V_S值，从电源传输给 R_L最

大可能的功率。

最大功率传输定理实际应用在立体声音响系统、收音机和公共广播方面，这些系统中负载是扬声器的电阻，而驱动扬声器的电路是功率放大器，该系统经典型优化使扬声器获得最大功率，因此，扬声器电阻必须等于放大器的源内阻。

例 6-18 显示了在 $R_L = R_S$时发生的最大功率。

【例 6-18】 图 6-57 中电源内阻为 75Ω，对下列可调电阻负载的每个值确定负载功率。

(a) 0Ω　(b) 25Ω　(c) 50Ω

(d) 75Ω　(e) 100Ω　(f) 125Ω

画出负载功率和负载电阻的对比图。

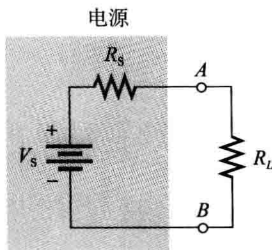


图 6-56 当 $R_L = R_S$时传输最大功率给负载

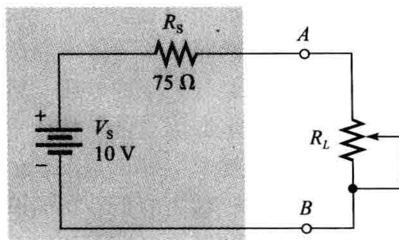


图 6-57 例 6-18 图

解： 利用欧姆定律（$I = V/R$）和功率计算公式（$P = I^2R$）对每个负载电阻值求负载功率。

(a) 对于 $R_L = 0\Omega$，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{V}}{75\Omega + 0\Omega} = 133\text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (133\text{mA})^2 \times 0\Omega = 0\text{mW}$$

(b) 对于 $R_L = 25\Omega$，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{V}}{75\Omega + 25\Omega} = 100\text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (100\text{mA})^2 \times 25\Omega = 250\text{mW}$$

(c) 对于 $R_L = 50\Omega$，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{V}}{75\Omega + 50\Omega} = 80\text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (80\text{mA})^2 \times 50\Omega = 320\text{mW}$$

(d) 对于 $R_L = 75\Omega$，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{V}}{75\Omega + 75\Omega} = 66.7\text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (66.7\text{mA})^2 \times 75\Omega = 334\text{mW}$$

(e) 对于 $R_L = 100\Omega$，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{V}}{75\Omega + 100\Omega} = 57.1\text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (57.1\text{mA})^2 \times 100\Omega = 326\text{mW}$$

(f) 对于 $R_L = 125\Omega$，

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} = \frac{10\text{V}}{75\Omega + 125\Omega} = 50\text{mA}$$

$$P_L = I^2R_L = (50\text{mA})^2 \times 125\Omega = 313\text{mW}$$

注意，当 $R_L = R_S = 75\Omega$ 与电源内阻相同时，负载功率最大，负载电阻小于或大于这个值，功率都下降，图 6-58 的曲线图说明这一趋势。

相关问题：如果图 6-57 中电源电阻为 600Ω，试问能够传输给负载的最大功率是多少？

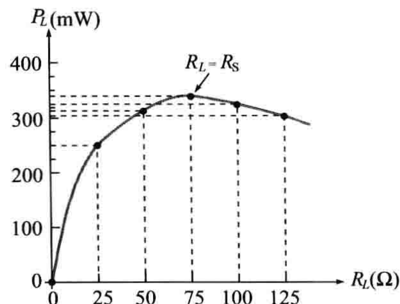


图 6-58　曲线表明 $R_L = R_S$ 时负载功率最大

本节测试题

1. 试说出最大功率传输定理。
2. 试问什么时候电源向负载提供最大功率？
3. 给定电路源内阻为 50Ω，试问获得最大功率的负载电阻值是多大？

6.8　叠加定理

有些电路需要多个电压源或电流源，例如，大多数放大器都有两个电压源：交流电源和直流电源。另外，有些放大器为了设置合适的工作条件，既需要正的直流电压源，还需要负的直流电压源。电路中使用多个电源时，叠加定理提供了进行分析的方法。

学习完本节内容，应该能够

- 应用叠加定理分析电路；
- 表述叠加定理；
- 列出使用叠加定理的步骤。

叠加定理是一种通过每次保留一个电源而其余电源用其内阻替代来确定含多个电源电路中电流的方法。理想电压源具有零内阻而理想电流源具有无限大内阻，为了简化起见，将所有电源都视为理想。

系统注释　物理学中的叠加定理

叠加定理并不只局限于电子电气系统，它可应用到任何具有两个或多个源（激励）的线性系统。物理学中叠加定理可用于各种波（包括声波和水波）、机械结构（梁）、场论、量子力学，甚至交叠的磁场或电场。



图片源自 Anja Kaiser/Fotolia. com

例如，来自独立源的水、声或光波相结合时，在一定范围内可以用叠加定理预测：两个波峰重叠波的振幅增大，而波峰和波谷重叠时它们相互抵消。叠加的另一个熟悉例子是飞机向前运动与风运动的叠加，两者的矢量和为飞机的净运动。

叠加定理：多电源线性电路任一给定支路的电流可以通过分别确定每个电源单独作用（其他电源则替换为其内阻）产生的电流求解，支路总电流等于各个电源在该支路产生电流的代数和。

应用叠加定理的步骤如下。

第一步：每次在电路中保留一个电压（或电流）源，其他电压（或电流）源用其内阻代替。对于理想电源，短路表示零内阻，开路表示无穷内阻。

第二步：对于只含一个电源的电路，确定需要求解的特定支路电流（或电压），这是要求总电流或电压的一个组成部分。

第三步：更换保留的电源，对每个电源重复第一、第二步。

第四步：为了求给定支路的实际电流（所有电源共同作用），代数相加所有电源的结果，

一旦求得了电流，利用欧姆定律可确定电压。

图6-59显示了含有两个理想电压源的串并联电路叠加的过程，注意学习图中的操作步骤。

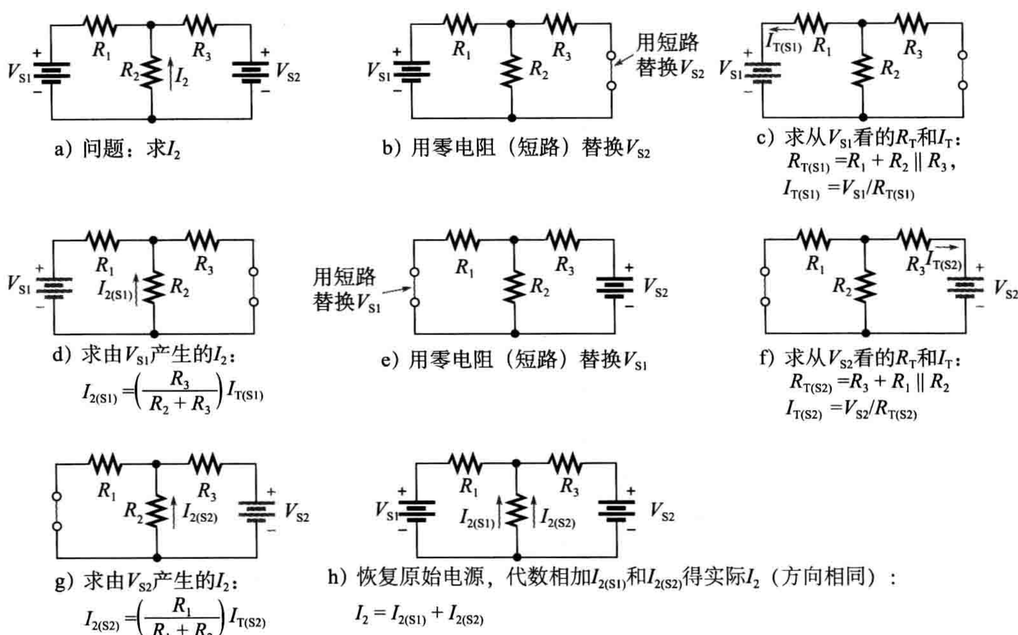


图6-59　叠加定理演示

【例6-19】　用叠加定理求图6-60中流过R_2的电流和它两端的电压。

解：第一步：用短路替代V_{S2}表示其内阻为零，求由电压源V_{S1}产生的流过R_2的电流，如图6-61所示。利用分压公式求I_2，从V_{S1}看出去，

$$R_{T(S1)}=R_1+R_2\parallel R_3=100\Omega+220\Omega\parallel 330\Omega=232\Omega$$

$$I_{T(S1)}=\frac{V_{S1}}{R_{T(S1)}}=\frac{10V}{232\Omega}=43.1mA$$

总电流中对应于V_{S1}的部分为

$$I_{2(S1)}=\left(\frac{R_3}{R_2+R_3}\right)I_{T(S1)}=\frac{330\Omega}{220\Omega+330\Omega}\times 43.1mA=25.9mA$$

注意该电流是通过R_2向上流。

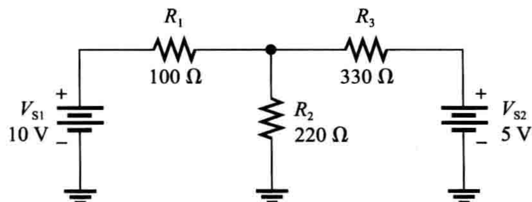


图　6-60

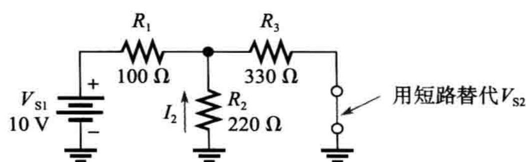


图　6-61

第二步：用短路替代V_{S1}，求由电压源V_{S2}产生的流过R_2的电流，如图6-62所示。从V_{S2}看出去，

$$R_{T(S2)} = R_3 + R_1 \parallel R_2 = 330\Omega + 100\Omega \parallel 220\Omega = 399\Omega$$

$$I_{T(S2)} = \frac{V_{S2}}{R_{T(S2)}} = \frac{5V}{399\Omega} = 12.5mA$$

总电流中对应于V_{S2}的部分为

$$I_{2(S2)} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) I_{T(S2)} = \frac{100\Omega}{100\Omega + 220\Omega} \times 12.5mA = 3.90mA$$

注意该电流是通过R_2向上流。

第三步：两个部分的电流都是通过R_2向上流，代数符号相同，因此，数值相加得流过R_2的总电流。

$$I_{2(tot)} = I_{2(S1)} + I_{2(S2)} = 25.9mA + 3.90mA = 29.8mA$$

R_2两端电压为

$$V_{R2} = I_{2(tot)} R_2 = 29.8mA \times 220\Omega = 6.56V$$

相关问题：如果图 6-60 中V_{S2}极性反转，试确定流过R_2的电流。

【例 6-20】 求图 6-63 中流过R_3的总电流和它两端的电压。

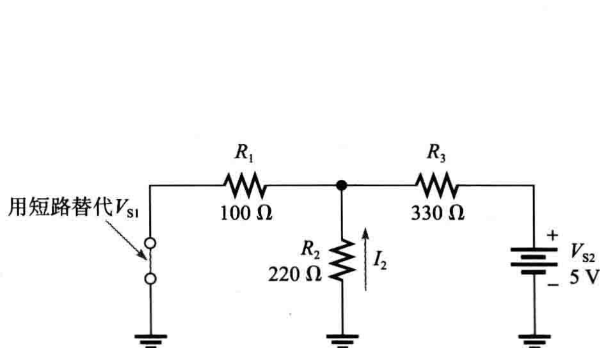


图 6-62

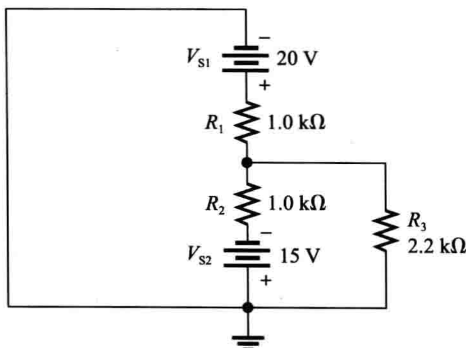


图 6-63

解： 第一步：用短路替代V_{S2}表示其内阻为零，求由电压源V_{S1}产生的流过R_3的电流，如图 6-64 所示。从V_{S1}看出去，

$$R_{T(S1)} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 1.0k\Omega + \frac{1.0k\Omega \times 2.2k\Omega}{3.2k\Omega} = 1.69k\Omega$$

$$I_{T(S1)} = \frac{V_{S1}}{R_{T(S1)}} = \frac{20V}{1.69k\Omega} = 11.8mA$$

现在应用分流公式求对应于V_{S1}的流过R_3的电流。

$$I_{3(S1)} = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3}\right) I_{T(S1)} = \frac{1.0k\Omega}{3.2k\Omega} \times 11.8mA = 3.69mA$$

注意该电流是通过R_3向上流。

第二步：用短路替代V_{S1}，求由电压源V_{S2}产生的流过R_3的电流，如图 6-65 所示。从V_{S2}看出去，

$$R_{T(S2)} = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = 1.0k\Omega + \frac{1.0k\Omega \times 2.2k\Omega}{3.2k\Omega} = 1.69k\Omega$$

$$I_{T(S2)} = \frac{V_{S2}}{R_{T(S2)}} = \frac{15V}{1.69k\Omega} = 8.88mA$$

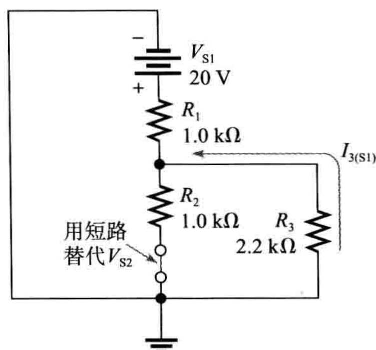


图 6-64

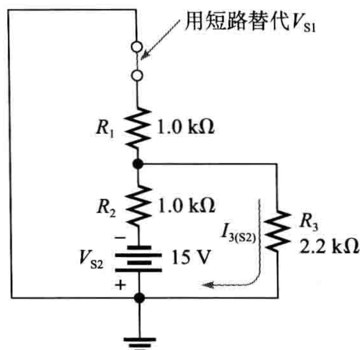


图 6-65

现在应用分流公式求对应于V_{S2}的流过R_3的电流。

$$I_{3(S2)}=\left(\frac{R_1}{R_1+R_3}\right)I_{T(S2)}=\frac{1.0\text{k}\Omega}{3.2\text{k}\Omega}\times 8.88\text{mA}=2.78\text{mA}$$

注意该电流是通过R_3向下流。

第三步：计算流过R_3的总电流和它两端的电压。

$$I_{3(tot)}=I_{3(S1)}-I_{3(S2)}=3.69\text{mA}-2.78\text{mA}=0.91\text{mA}=910\mu\text{A}$$

$$V_{R3}=I_{3(tot)}R_3=910\mu\text{A}\times 2.2\text{k}\Omega\approx 2\text{V}$$

电流是通过R_3向上流。

相关问题：如果图6-63中V_{S1}变为12V且极性反转，试确定流过R_3的总电流。

虽然直流稳压电源接近理想电压源，但是许多其他电源却是非理想的，例如，发电机一般具有50Ω或600Ω的内阻，表现为与理想电压源串联的电阻。同样，电池在新的时候可以看成是理想的，但随着使用，旧电池的内阻将会增大。使用叠加定理时，重要的是要识别电源什么时候是非理想的，用其等效内阻来替代。

电流源没有电压源那么普遍，一般也都是非理想的。如果电流源是非理想的，就像晶体管那样，在应用叠加定理时，应该用其等效内阻来做替代。

本节测试题

1. 试表述叠加定理。
2. 试问为什么叠加定理对分析多电源线性电路有用?
3. 试问为什么在运用叠加定理时要对理想电压源短路?
4. 作为应用叠加定理的结果，如果流过电路中某支路的两部分电流方向相反，试问净电流的方向是什么?

6.9 故障排除

故障排除是对电路中的故障或问题识别与定位的过程。在前面串联电路和并联电路中已经讨论了一些故障排除技术和逻辑思维的运用。故障排除的一个基本前提是，必须知道要寻找的东西，然后才可能成功地排除电路故障。

学习完本节内容，应该能够

- 对串并联电路进行故障排除；
- 确定电路中开路的影响；
- 确定电路中短路的影响；
- 定位开路和短路。

开路和短路是电路中发生的典型问题。如第 4 章所述，如果电阻烧坏就会导致开路，不好的焊接、断线和接触不良等也可能造成开路。外来物体（如焊接飞溅物）、电线的绝缘破损等则可能导致电路中发生短路。短路被认为是在两点之间的零电阻路径。

除了完全的开路或短路，电路中还会发生部分开路或短路。部分开路就是一个远高于正常值的电阻，但不是无限大；而部分短路则是远低于正常值的电阻，但不是零。

下面三个例子演示了串并联电路故障排除的过程。

【例 6-21】 从图 6-66 指示的电压表读数中，应用 APM 方法确定是否存在故障。如果有故障，识别是短路故障还是开路故障。

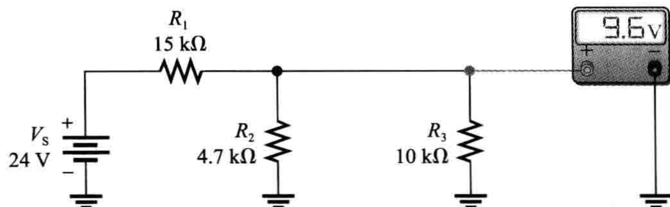


图　6-66

解： 第一步：分析。确定电压表应该指示什么，因为 R_2 和 R_3 并联，所以它们的组合电阻是

$$R_{2\|3}=\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}=\frac{4.7\text{k}\Omega\times10\text{k}\Omega}{14.7\text{k}\Omega}=3.2\text{k}\Omega$$

利用分压公式确定并联组合两端电压。

$$V_{2\|3}=\left(\frac{R_{2\|3}}{R_1+R_{2\|3}}\right)V_S=\frac{3.2\text{k}\Omega}{18.2\text{k}\Omega}\times24\text{V}=4.22\text{V}$$

计算显示电压表应该得到 4.22V 的读数，但是，在 $R_{2\|3}$ 两端电压表读出 9.6V，这个值是不正确的，高于正常值，可能是 R_2 或 R_3 开路了。因为这两个电阻之一开路，则电压表所跨接的电阻就会大于预期值，电路中高电阻值电压降也高。

第二步：计划。假设 R_2 开路开始查找开路电阻，如果 R_2 开路，则 R_3 两端的电压为

$$V_3=\left(\frac{R_3}{R_1+R_3}\right)V_S=\frac{10\text{k}\Omega}{25\text{k}\Omega}\times24\text{V}=9.6\text{V}$$

因为测量值是 9.6V，计算表明 R_2 可能开路。

第三步：测量。切断电源并拆出 R_2，测量其电阻值以检验是否开路；如果不是，则检查连线、焊接或 R_2 周围是否有开路。

相关问题：如果在图 6-66 中 R_3 开路，试问电压表的读数会是多少？如果 R_1 开路呢？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E06-21，确定电路中是否存在故障，如果有故障，将故障隔离到一个元件。

【例 6-22】 在图 6-67 中，假设用电压表测得 24V 电压，试确定是否有故障，如果有故障，识别该故障。

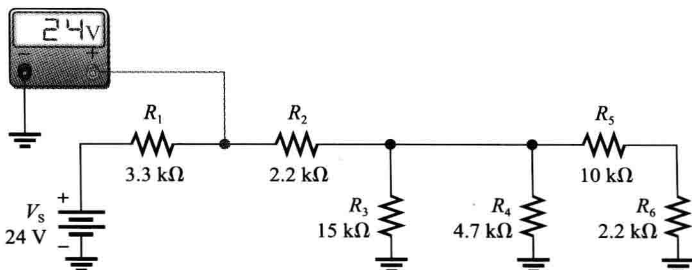


图　6-67

解： 第一步：分析。由于电阻 R_1 两端电压都是 24V，因此 R_1 上没有电压降，一种可能是没有电流流过 R_1，这告诉我们电路中 R_2 开路；另一种可能就是

R_1短路。

第二步：计划。最大可能是R_2开路。如果确实是R_2开路，则将没有电源电流。为了检验，计划用电压表测量R_2两端的电压。如果R_2开路，电压表将指示24V，由于没有电流流过任一电阻产生电压降，所以R_2右端为零伏。

第三步：测量。检验R_2是否开路的测量如图6-68所示。

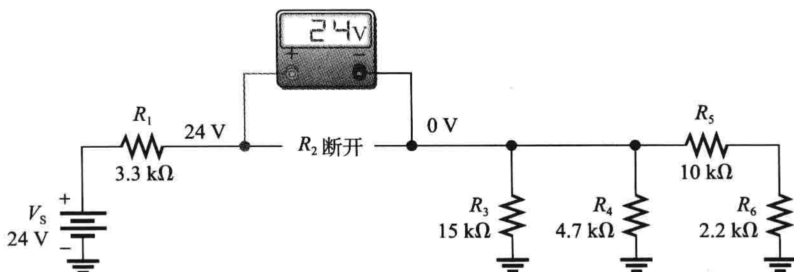


图 6-68

相关问题：若图6-67中R_5开路，如果没有其他故障，试问R_5两端的电压为多大？

Multisim 仿真

打开Multisim仿真文件E06-22，确定电路中是否存在故障，如果有故障，将故障隔离到一个元件。

【例6-23】 在图6-69中两个电压表读数如图所示，应用逻辑思维和已有的电路操作知识确定电路中是否存在开路或短路故障，如果有故障，请定位故障。

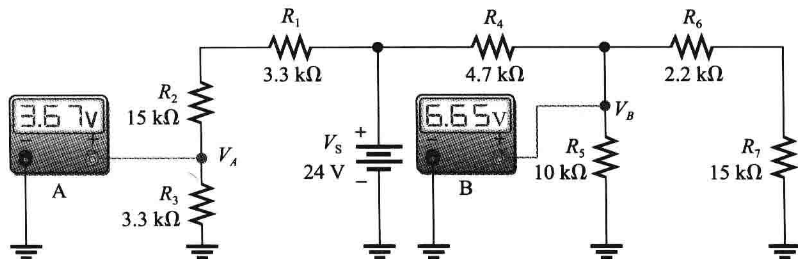


图 6-69

解：第一步：确定电压表读数是否正确。R_1、R_2、R_3形成分压器，计算R_3两端电压（V_A）如下：

$$V_A = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}\right)V_S = \frac{3.3\text{k}\Omega}{21.6\text{k}\Omega} \times 24\text{V} = 3.67\text{V}$$

电压表A读数正确，这表明R_1、R_2、R_3已经连接且无故障。

第二步：检查电压表B读数是否正确。R_6+R_7与R_5并联，R_6、R_7和R_5的串并联组合再与R_4串联，计算R_5、R_6和R_7组合的电阻如下：

$$R_{5||(6+7)} = \frac{R_5(R_6 + R_7)}{R_5 + R_6 + R_7} = \frac{10\text{k}\Omega \times 17.2\text{k}\Omega}{27.2\text{k}\Omega} = 6.32\text{k}\Omega$$

$R_{5||(6+7)}$与R_4形成分压器，电压表B测量$R_{5||(6+7)}$两端电压，检查如下：

$$V_B = \left(\frac{R_{5||(6+7)}}{R_4 + R_{5||(6+7)}}\right)V_S = \frac{6.32\text{k}\Omega}{11\text{k}\Omega} \times 24\text{V} = 13.8\text{V}$$

而实际测得电压（6.65V）在这一点不正确，一些逻辑思维将帮助隔离问题。

第三步：判断 R_4 没有开路，否则电表读数将为0V，而如果 R_4 存在短路，则电表读数将为24V。由于实际电表读数小于其应该的读数，因此说明 $R_{5 \| (6+7)}$ 小于计算得到值6.32kΩ，最大可能的问题是 R_7 两端有短路。如果从 R_7 的顶端到接地端存在短路，实际是 R_6 与 R_5 并联。这种情况下，

$$R_5 \| R_6 = \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6} = \frac{10\text{k}\Omega \times 2.2\text{k}\Omega}{12.2\text{k}\Omega} = 1.80\text{k}\Omega$$

则 V_B 为

$$V_B = \frac{1.80\text{k}\Omega}{6.5\text{k}\Omega} \times 24\text{V} = 6.65\text{V}$$

V_B 这个值与电压表B的读数吻合，所以在 R_7 两端有短路。若这是一个实际电路，则需要寻找造成短路的物理原因。

相关问题：若图6-69中唯一的故障是 R_2 被短路，试问电压表A会有什么读数？电压表B会有什么读数？

Multisim 仿真

打开Multisim仿真文件E06-23，确定电路中是否存在故障，如果有故障，将故障隔离到一个元件。

本节测试题

1. 给出两种常见电路故障的名称。
2. 对于图6-70的下列故障，试确定在节点 A 测得的电压：
   (a) 无故障 (b) R_1 开路
   (c) R_5 两端短路 (d) R_3 和 R_4 开路 (e) R_2 开路
3. 在图6-71所示的电路中，有一个电阻开路，请基于电表读数，确定哪个电阻开路。

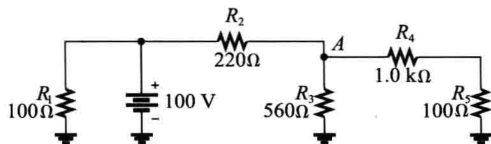


图 6-70

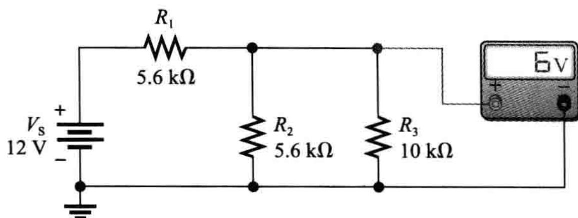


图 6-71

本章小结

- 串并联电路是串联电流路径与并联电流路径的组合。
- 为了确定串并联电路的总电阻，需识别串联和并联关系，然后再应用第4章的串联电阻公式和第5章的并联电阻公式。
- 用总电压除以总电阻求总电流。
- 应用分流公式、基尔霍夫电流定律或欧姆定律确定分支电流，分别考虑每个电路的问题，以确定最合适的方法。
- 应用分压公式、基尔霍夫电压定律或欧姆定律确定串并联电路任一部分的电压降，分别考虑每个电路的问题，以确定最合适的方法。
- 当分压器输出端接上负载电阻时，输出电压降低。
- 为了最小化负载效应，负载电阻应远大于它所跨接的电阻。虽然10倍值常作为经验准则，而具体数值则取决于输出电压的准确性要求。
- 对于具有两个或两个以上电源的电路中任意电压和电流，可以利用叠加定理每次保留一个电

源逐次求解。

- 平衡的惠斯通电桥可用来测量未知电阻。
- 输出电压为零时电桥平衡。平衡条件下，跨接在电桥输出端的负载电流为零。
- 不平衡的惠斯通电桥能用于测量传感器得到的物理量。
- 不管多么复杂的任意二端电阻电路都能够用其戴维南等效替代。
- 戴维南等效电路由等效电阻（R_{TH}）串联等效电压源（V_{TH}）组成。
- 最大功率传输定理说明，当 $R_S = R_L$ 时从电源传输给负载的功率最大。
- 开路和短路是电路中的典型故障。
- 电阻器损坏时通常为开路。

关键术语

平衡电桥（Balanced bridge）　平衡状态下的电桥电路，电桥两端电压为零。

泄漏电流（Bleeder current）　流入电路的总电流减去总负载电流后剩下的电流。

负载电流（Load current）　电路提供给负载的电流。

加载（Loading）　接在电路输出端的元件吸取电流而对电路产生的影响。

最大功率传输（Maximum power transfer）　一种电路条件，当负载电阻等于电源内阻时，电源传输给负载最大功率。

叠加（Superposition）　一种用于分析两个及两个以上电源电路的方法，分别研究每个电源单独的效应，然后组合这些效应。

端子等效（Terminal equivalency）　一种电路条件，两个电路接任意的相同负载电阻时，产生相同的负载电压和负载电流。

戴维南定理（Thevenin's theorem）　一个简化电路的定理，任意两端电阻电路可简化为单个等效电压源与等效电阻的串联。

不平衡电桥（Unbalanced bridge）　不平衡状态的电桥电路，电桥两端电压大小与电桥偏离平衡状态的量成比例。

惠斯通电桥（Wheatstone bridge）　一种四臂电桥，利用它的平衡状态可以精确测量未知电阻，利用它的不平衡状态，可以测量电阻的偏差。

关键公式

(6-1) $I_{泄漏} = I_T - I_{RL1} - I_{RL2}$　泄漏电流

(6-2) $R_X = R_V\left(\dfrac{R_2}{R_4}\right)$　惠斯通电桥中的未知电阻

(6-3) $R_T = \dfrac{R}{n}$　n 个等阻值电阻并联的特殊情况

是非测验题

1. 并联电阻总接在同一节点对之间。
2. 如果一个电阻与一并联组合相串联，则串联电阻电压降将总是大于并联电阻电压降。
3. 在串并联组合电路中，并联电阻的电流总是相等。
4. 大的负载电阻对电路具有小的负载效应。
5. 测量直流电压时，DMM 通常对电路的负载效应小。
6. 测量直流电压时，不管使用什么量程，DMM 的输入电阻都是相同的。
7. 测量直流电压时，不管使用什么量程，模拟万用表的输入电阻都是相同的。
8. 戴维南电路由电压源与电阻并联组成。
9. 理想电压源的内阻为零。
10. 为了传输最大功率给负载，负载电阻必须两倍于电源的戴维南电阻。

自测题

1. 考虑图 6-72 所示的电路，下列哪些说法正确？

   (a) R_1 和 R_2 与 R_3、R_4、R_5 串联

(b) R_1与R_2串联

(c) R_3、R_4、R_5并联

(d) R_1和R_2的串联组合与R_3、R_4、R_5的串联组合相并联

(e) 答案(b)和(d)

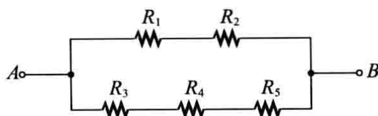


图 6-72

2. 图6-72的总电阻可用下面哪个公式求得?

(a) $R_1+R_2+R_3 \parallel R_4 \parallel R_5$

(b) $R_1 \parallel R_2+R_3 \parallel R_4 \parallel R_5$

(c) $(R_1+R_2) \parallel (R_3+R_4+R_5)$

(d) 都不对

3. 如果图6-72中所有电阻的阻值相同,在A和B端之间加电压,电流是

(a) R_5中最大

(b) R_3、R_4和R_5中最大

(c) R_1和R_2中最大

(d) 所有电阻中相同

4. 两个1.0kΩ电阻串联,再与2.2kΩ电阻并联,其中一个1.0kΩ电阻两端的电压为6V,则2.2kΩ电阻两端的电压为

(a) 6V　　(b) 3V

(c) 12V　　(d) 13.2V

5. 330Ω电阻和470Ω电阻的并联组合再与四个1.0kΩ电阻的并联组合串联,电路两端接10V电源,具有最大电流的电阻阻值是

(a) 1.0Ω　　(b) 330Ω　　(c) 470Ω

6. 问题5所述的电路中,具有最大电压的电阻值是

(a) 1.0kΩ　　(b) 330Ω　　(c) 470Ω

7. 问题5所述的电路中,流过任一单个1.0kΩ电阻的电流占总电流的百分比为

(a) 100%　　(b) 25%

(c) 50%　　(d) 31.25%

8. 某分压器无负载时电压为9V,接上负载时输出电压

(a) 增大　　(b) 减小

(c) 保持不变　　(d) 变成零

9. 某分压器由两个10kΩ电阻串联组成,下面哪个负载对输出电压影响最大?

(a) 1.0MΩ　　(b) 20kΩ

(c) 100kΩ　　(d) 10kΩ

10. 分压器输出端接上负载电阻时,从电源吸取的电流

(a) 减小　　(b) 增加

(c) 保持不变　　(d) 切断

11. 平衡惠斯通电桥的输出电压是

(a) 等于源电压

(b) 等于零

(c) 取决于电桥中所有电阻值

(d) 取决于未知电阻值

12. 分析含有两个或两个以上电源电路的主要方法通常是

(a) 戴维南定理　　(b) 欧姆定律

(c) 叠加定理　　(d) 基尔霍夫定律

13. 某两电源电路,一个电源单独作用在给定支路中产生10mA电流,另一个电源单独作用在同一支路中产生反方向8mA电流,两个电源共同作用时该支路的总电流是

(a) 10mA　　(b) 8mA

(c) 18mA　　(d) 2mA

14. 戴维南等效电路由哪个组成?

(a) 电压源与电阻串联

(b) 电压源与电阻并联

(c) 电流源与电阻并联

(d) 两个电压源与一个电阻

15. 内阻300Ω的电压源传输最大功率给

(a) 150Ω负载　　(b) 50Ω负载

(c) 300Ω负载　　(d) 600Ω负载

16. 电路某点具有非常高的电阻值,现测量该点电压,测量值比预期值低一些,这可能是由于

(a) 一个或多个电阻断开了

(b) 电压表的负载效应

(c) 电源电压太低

(d) 上述所有答案

故障排除：征兆与原因

参考图 6-73，给每一组征兆确定原因。

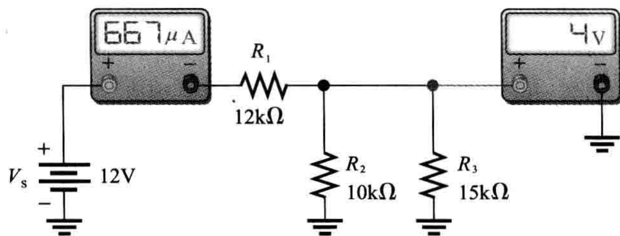


图 6-73 电表指示电路的正确读数

1. 征兆：电流表读数太低，电压表读数为 5.45V。
   原因：(a) R_1开路
   (b) R_2开路
   (c) R_3开路
2. 征兆：电流表读数为 1mA，电压表读数为 0V。
   原因：(a) R_1两端存在短路
   (b) R_2两端存在短路
   (c) R_3开路
3. 征兆：电流表读数接近零，电压表读数为 12V。
   原因：(a) R_1开路
   (b) R_2开路
   (c) R_2和R_3开路
4. 征兆：电流表读数为 444μA，电压表读数为 6.67V。
   原因：(a) R_1被短路
   (b) R_2开路
   (c) R_3开路
5. 征兆：电流表读数为 2mA，电压表读数为 12V。
   原因：(a) R_1被短路
   (b) R_2被短路
   (c) R_2和R_3开路

习题

基本习题

6.1 节

1. 从电源两端看，识别图 6-74 所示的串并联关系。

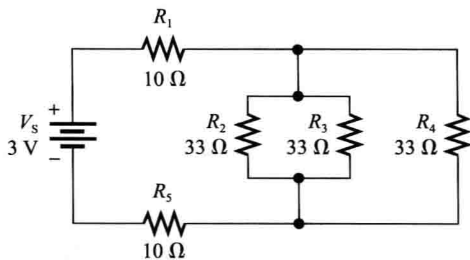


图 6-74

2. 试画出以下的串并联组合：
   (a) R_1与R_2和R_3的并联组合串联
   (b) R_1与R_2和R_3的串联组合并联
   (c) R_1与一个包含R_2与其他四个电阻并联组合串联的支路相并联
3. 试画出以下的串并联组合：
   (a) 三条支路并联组合，每条支路含有两个串联电阻
   (b) 三个并联电路的串联组合，每个并联电路包含两个并联电阻
4. 在图 6-75 的每个电路中，从电源看过去，识别电阻的串并联关系。

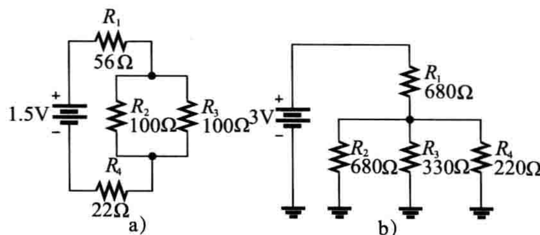


图 6-75

6.2 节

5. 某电路由两个并联电阻组成，总电阻为 667Ω，其中一个电阻为 1.0kΩ，试问另一个电阻是多少？
6. 对于图 6-76 所示的电路，试确定 A、B 之间的

总电阻。其中，电阻 R_1 与 R_2 的色环颜色分别为：棕、黑、黑、金；电阻 R_3、R_4、R_5 的色环颜色分别为：橙、橙、黑、金。

7. 试求图 6-75 中每个电路的总电阻。
8. 试求图 6-74 中流过每个电阻的电流，然后计算电压降。
9. 试求图 6-75 所示的两个电路中流过每个电阻的电流，然后计算电压降。
10. 在图 6-77 中，求下列各量：
    (a) A、B 之间的总电阻
    (b) 接在 A、B 端之间 6V 电源流出的总电流
    (c) 流过 R_5 的电流
    (d) R_2 两端的电压
11. 在图 6-77 中，对于 $V_{AB}=6\text{V}$，求流过 R_2 的电流。

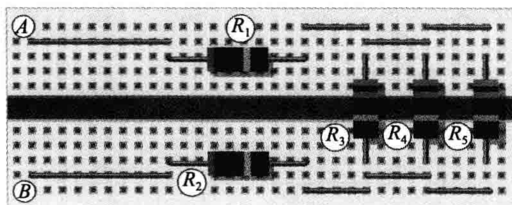


图　6-76

12. 在图 6-77 中，对于 $V_{AB}=6\text{V}$，求流过 R_4 的电流。

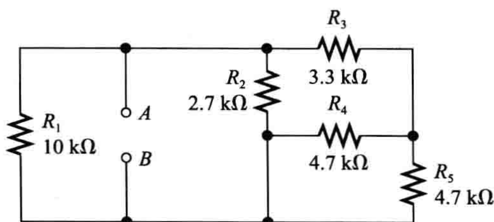


图　6-77

6.3 节

13. 两个 56kΩ 电阻和 15V 电源构成一个分压器，计算在一个 56kΩ 电阻上的空载输出电压。如果在输出端接 1.0MΩ 的负载电阻，试问输出电压将是多大？
14. 12V 电池输出分压得到两个输出电压，用三个 3.3kΩ 电阻来提供两个输出，每次只能有一个输出带 10kΩ 负载，试确定两种情况的输出电压。
15. 对于给定的分压器，10kΩ 负载和 56kΩ 负载哪个将导致输出电压的降低更小？
16. 在图 6-78 中，试确定输出端无负载时从电池吸取的电流，若带上 10kΩ 负载则从电池吸取的电流为多大？

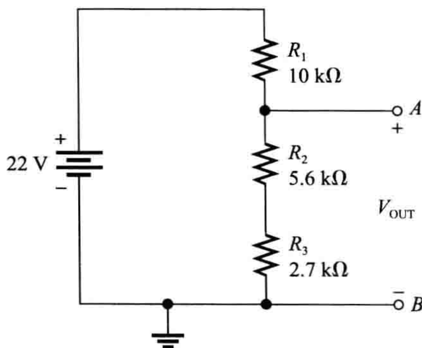


图　6-78

6.4 节

17. 内阻 10MΩ 的电压表跨接在下列哪个电阻两端时对电路的负载效应最小？
    (a) 100kΩ　　(b) 1.2MΩ
    (c) 22kΩ　　(d) 8.2MΩ
18. 由三个 1.0MΩ 电阻构成的分压器串联到 100V 电源上，试确定用 10MΩ 电压表测量其中一个电阻两端的电压。
19. 试问在习题 18 中测量值与实际空载电压有何差别？
20. 在习题 18 中，电压表改变了它所测电压的百分比是多少？
21. 用10 000Ω/V 的 VOM（模拟电压-电阻表）10V 量程测量分压器的输出电压，如果分压器由两个 100kΩ 电阻构成，试问在一个电阻两端测得的电压占电源电压的比例是多少？
22. 如果用输入电阻为 10MΩ 的 DMM 代替习题 21 中的 VOM，试问用 DMM 测量得到的一电源电压百分比是多少？

6.5 节

23. 一个未知数值的电阻接在惠斯通电桥电路中，平衡条件下电桥参数如下：$R_V=18\text{k}\Omega$、$R_2/R_4=0.02$，请问 R_X 等于多少？
24. 电桥网络如图 6-79 所示，为使电桥平衡，试问 R_V 必须调到什么值？

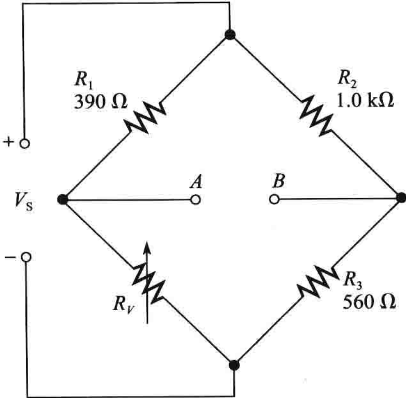


图 6-79

25. 试确定图6-80所示的平衡电桥中R_V的值。

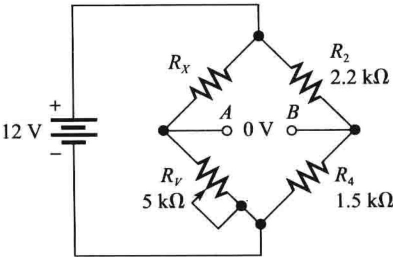


图 6-80

26. 试确定65℃时图6-81所示不平衡电桥的输出电压，热敏电阻25℃的标称阻值为1kΩ，正温度系数，假设温度每变化一度电阻变化5Ω。

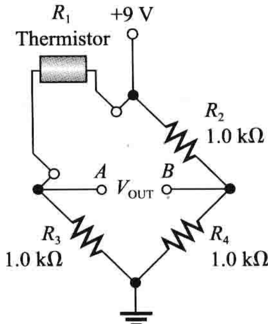


图 6-81

6.6 节

27. 从A、B端观察，将图6-82所示的电路简化为戴维南等效。

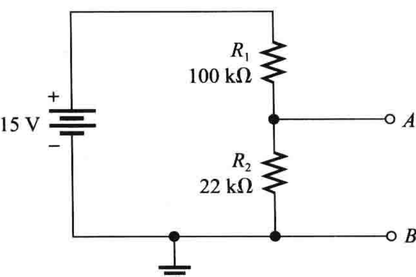


图 6-82

28. 对图6-83中的各个电路，确定从A、B端看进去的戴维南等效。

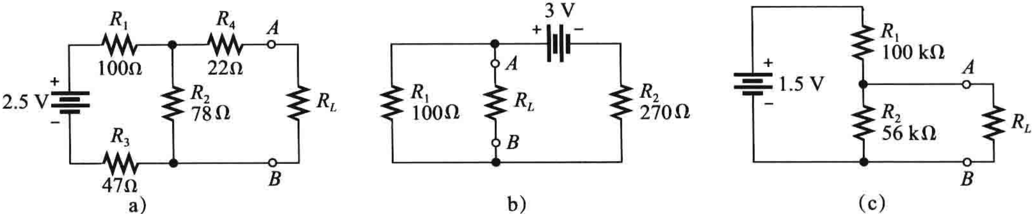


图 6-83

29. 试确定图6-84中R_L的电压和电流。

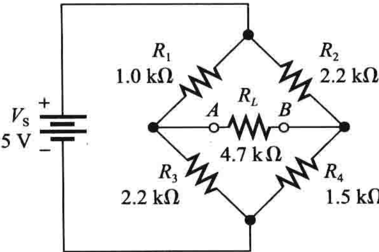


图 6-84

6.7 节

30. 在图6-82的A、B端接负载电阻，试确定传输最大功率给负载时的负载电阻值。
31. 某戴维南等效电路具有$V_{TH}=5.5V$、$R_{TH}=75\Omega$，试问它能给什么值的负载电阻传输最大功率？
32. 在图6-83a中，试确定消耗最大功率时的阻值R_L。

6.8 节

33. 在图6-85中，利用叠加定理求R_3中的电流。
34. 在图6-85中，流过R_2的电流是什么？

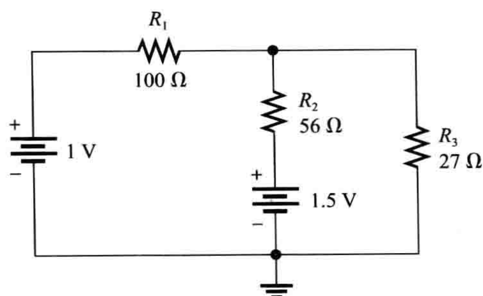
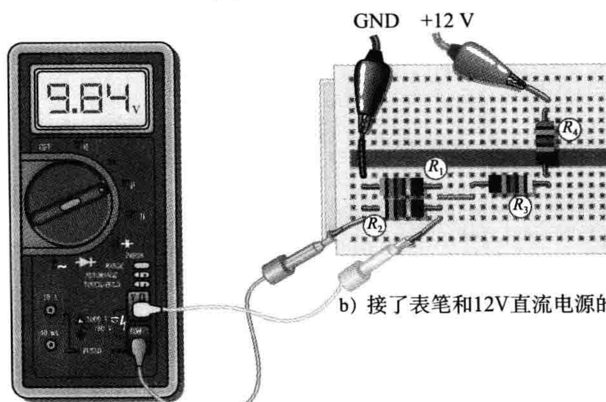


图 6-85

6.9 节

35. 图 6-86 中电压表读数正确吗？如果不正确，是什么问题？其中，电阻 R_1 的色环颜色为：蓝、灰、棕、银；R_2 的色环颜色为：黄、紫、红、银；R_3 的色环颜色为：黄、紫、棕、金；R_4 的色环颜色为：绿、蓝、棕、金。
36. 如果图 6-87 中 R_2 开路，试问在 A、B、C 点读出的电压是多少？



a) 表笔接到面包板的万用表

b) 接了表笔和12V直流电源的面包板

图 6-86

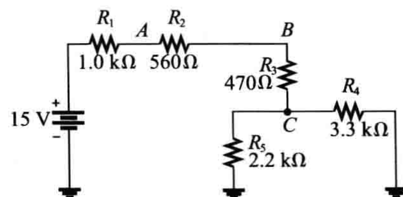


图 6-87

37. 检查图 6-88 中电表读数并定位可能存在的故障。

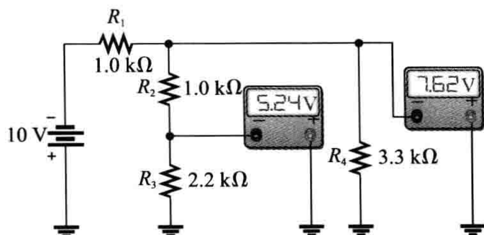


图 6-88

38. 在图 6-87 中，对应下列每种故障，确定每个电阻两端预期测量得到的电压，假设每个故障互相独立。

(a) R_1 开路　(b) R_3 开路

(c) R_4 开路　(d) R_5 开路

(e) C 点到地短路

39. 在图 6-88 中，对应下列每种故障，确定每个电阻两端预期测量得到的电压。

(a) R_1 开路　(b) R_2 开路

(c) R_3 开路　(d) R_4 两端短路

高级习题

40. 在图 6-89 所示的每个电路中，从电源看出去，确定电阻的串并联关系。
41. 绘制如图 6-90 所示 PC 板布局的原理图，标出电阻值并确定串并联关系。如有的话，哪个电

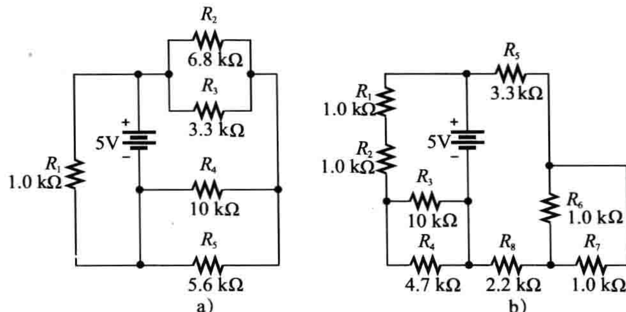


图 6-89

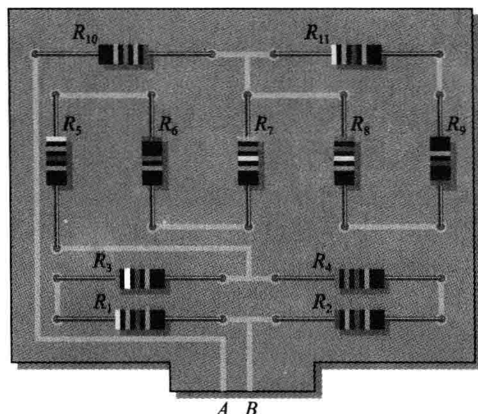


图 6-90

阻可以移去而不影响 R_T？其中，

电阻 R_1 的色环颜色分别为：黄、紫、红、金；

电阻 R_2 的色环颜色分别为：红、紫、棕、金；

电阻 R_3 的色环颜色分别为：橙、白、棕、金；

电阻 R_4 的色环颜色分别为：棕、棕、红、金；

电阻 R_5 的色环颜色分别为：黄、紫、红、金；

电阻 R_6 的色环颜色分别为：棕、黑、绿、金；

电阻 R_7 的色环颜色分别为：蓝、灰、黄、金；

电阻 R_8 的色环颜色分别为：绿、棕、黄、金；

电阻 R_9 的色环颜色分别为：棕、黑、红、金；

电阻 R_{10} 的色环颜色分别为：棕、蓝、绿、金；

电阻 R_{11} 的色环颜色分别为：黄、紫、红、金。

42. 对于图 6-91 所示的电路，计算下列各量：
    (a) 电源两端的总电阻
    (b) 从电源流出的总电流
    (c) 流过 910Ω 电阻的电流
    (d) 从 A 点到 B 点的电压

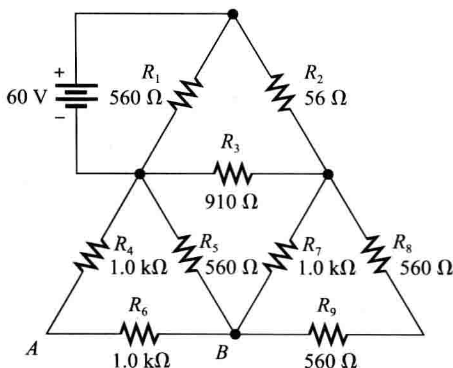


图 6-91

43. 试确定图 6-92 所示电路的总电阻和 A、B、C 点电压。

44. 试确定图 6-93 所示电路 A、B 端之间的总电阻，并计算当 A、B 之间加 10V 电压时每条支路的电流。

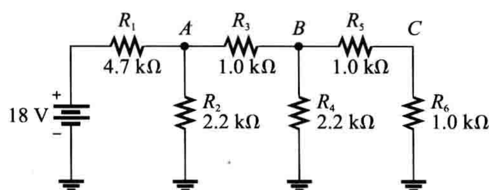


图 6-92

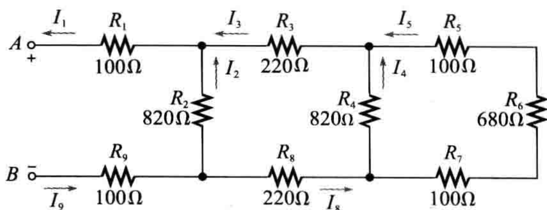


图 6-93

45. 当图 6-93 的 A、B 之间加 10V 电压时，试问每个电阻两端的电压是多少？

46. 求图 6-94 中的电压 V_{AB}。

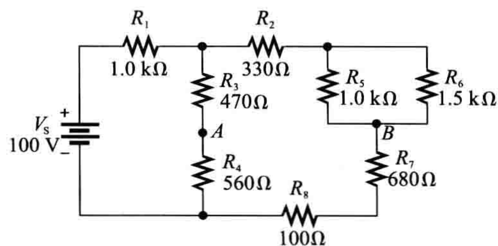


图 6-94

47. 求图 6-95 中 R_2 的值。

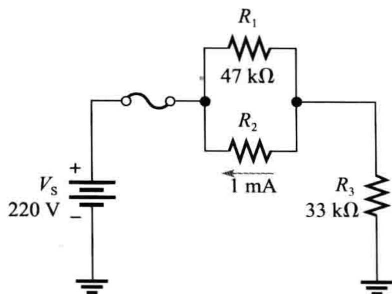


图 6-95

48. 试确定图6-96所示电路的总电阻和A、B、C点电压。

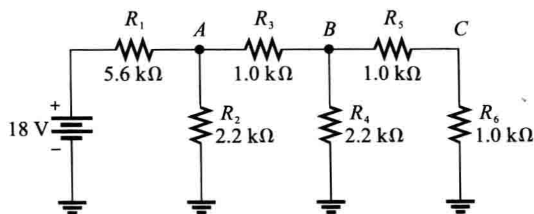


图 6-96

49. 请开发一个分压器，要求空载输出6V电压，而在1.0kΩ负载两端最小输出5.5V电压，电源电压采用24V，空载电流不超过100mA。

50. 试确定满足下列指标的分压器电阻值：空载条件下电流不超过5mA，电源电压为10V，需要有一个5V输出和一个2.5V输出。画出该电路，并确定1.0kΩ负载电阻接到每个输出时对输出电压的影响。

51. 利用叠加定理计算图6-97最右边支路的电流。

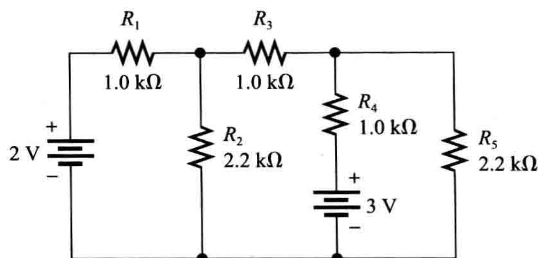


图 6-97

52. 针对下列条件确定图6-98所示电路的V_{OUT}。

(a) 开关SW2接12V电压，其余开关接地

(b) 开关SW1接12V电压，其余开关接地

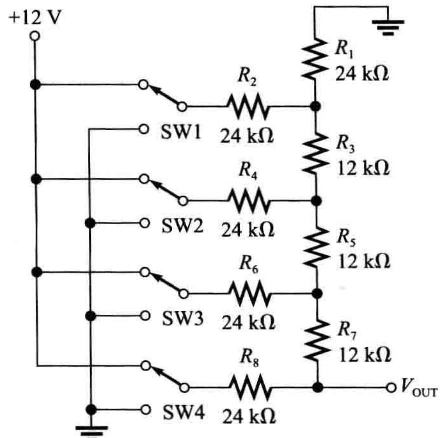


图 6-98

53. 图6-99的分压器有一个切换负载，对于开关的每个位置确定各个抽头的电压（V_1、V_2和V_3）。

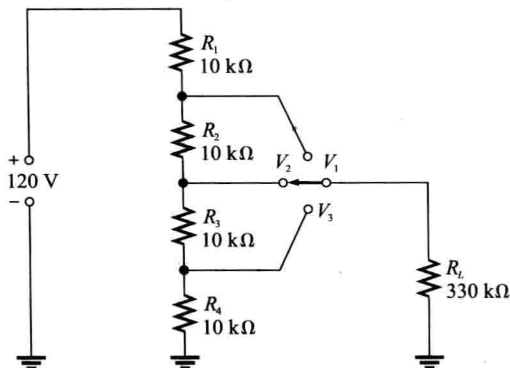


图 6-99

54. 图6-100显示了场效应晶体管放大器的直流偏置结构，偏置是一种常见的保障放大器正常工作的方法，通过偏置为放大器设置一定的直流电压。虽然目前我们还不熟悉晶体管放大器，但是，用已经学过的方法也可以确定电路中的直流电压和电流。

(a) 求对地电压V_G和V_S。

(b) 确定电流I_1、I_2、I_D和I_S。

(c) 求V_{DS}和V_{DG}。

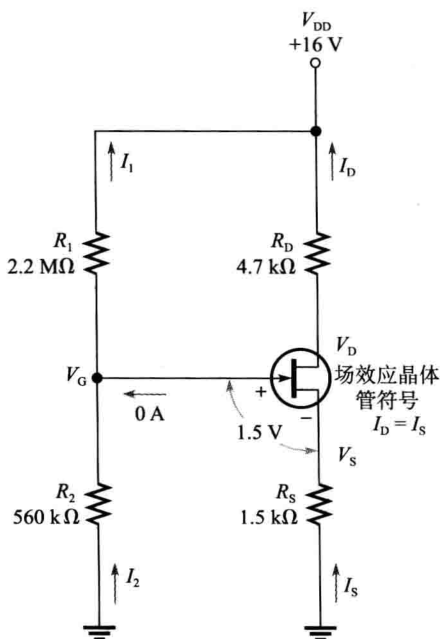


图 6-100

55. 对于图6-100所示的电路，如果R_1开路，试问V_G为多大？

56. 对于图6-100所示的电路，如果将R_1和R_2位置互换，试问V_G为多大?
57. 图6-101中有一个故障，基于电压表读数，试确定该故障是什么。

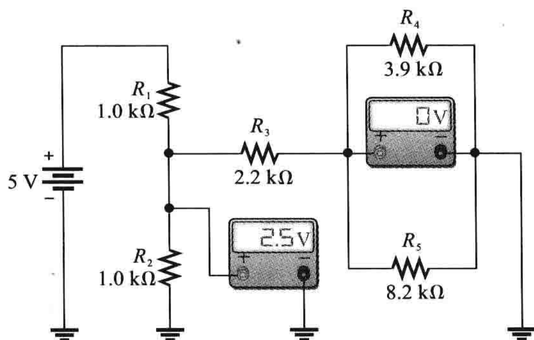


图 6-101

58. 假设某学生决定将图6-30中电阻R_1和R_2的阻值增大十倍，结果电压从3.7V降到2.8V，试解释为什么会这样。
59. 假设没有负载效应，试计算图6-31所示电路的基极电压。
60. 假设晶体管具有和470kΩ电阻同样的负载效应，重复习题59的计算。
61. 假设一个4-20mA电流环终端接150Ω电阻，试问4mA电流表示什么电压? 20mA电流又表示什么电压?
62. 对于图6-40所示的液位传感系统，假设注满水箱的总重量为1700磅，空水箱的重量为300磅，如果压力传感器指示的总重量为700磅，试问显示的百分比是什么?
63. 对于图6-40所示的液位传感系统，使用三个压力传感器比使用四个有何优点?

Multisim 仿真故障排除习题

64. 打开文件P06-64，试确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
65. 打开文件P06-65，试确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
66. 打开文件P06-66，试确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
67. 打开文件P06-67，试确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
68. 打开文件P06-68，试确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
69. 打开文件P06-69，试确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
70. 打开文件P06-70，试确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
71. 打开文件P06-71，试确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。

各节测试题答案

6.1 节

1. 见图6-102。

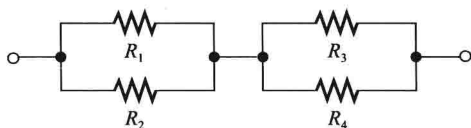


图 6-102

2. R_1、R_2与R_3和R_4的并联组合串联。
3. 所有电阻都并联。
4. R_1和R_2并联，R_3和R_4并联。
5. 是的，两个并联组合互相串联。

6.2 节

1. $R_T=R_1+R_4+R_2 \,||\, R_3=599\Omega$
2. $I_3=11.2\text{mA}$
3. $V_{R2}=I_2R_2=3.7\text{V}$
4. $R_T=89\Omega$；$I_T=11.2\text{mA}$

6.3 节

1. 负载电阻使输出电压减小。
2. T
3. $V_{OUT(空载)}=19.23\text{V}$；$V_{OUT(有载)}=19.16\text{V}$

6.4 节

1. 由于电压表的内阻表现为与它跨接测量电路的电阻并联，减小了电路这两点之间的电阻，并从电路吸取电流，这就构成了电路的负载。
2. 不，因为电表内阻远大于1.0kΩ。
3. 是。
4. 4.0MΩ

6.5 节

1. 见图6-103。
2. 当输出电压为零时电桥平衡。
3. $R_X=15\text{k}\Omega$
4. 不平衡电桥用于测量传感器感测的物理量。

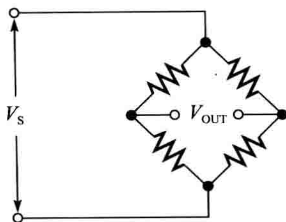


图 6-103

5. 压力传感器是一种用应变计将机械力转化为电信号的传感器。

6.6 节

1. 戴维南等效电路由 V_{TH} 和 R_{TH} 构成。
2. 见图 6-104。

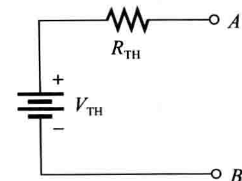


图 6-104

3. V_{TH} 是电路中两点之间的开路电压。
4. R_{TH} 是当所有电源用其内阻替代后从电路两端看入的电阻。
5. 见图 6-105。

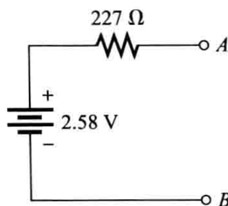


图 6-105

6.7 节

1. 最大功率传输定理表明，当负载电阻等于电源内阻时，电源传输最大功率给负载。
2. 当 $R_L = R_S$ 时传递到负载的功率最大。
3. $R_L = R_S = 50\Omega$

6.8 节

1. 多电源线性电路的任一条支路总电流，等于各个电源单独作用、其他电源用其内阻替代产生电流的代数和。
2. 叠加定理允许对每个电源独立进行处理。
3. 短路是对理想电压源零内阻的模拟。
4. 净电流方向为数值较大的电流方向。

6.8 节

1. 开路与短路是两种常见故障。
2. (a) 62.8V (b) 62.8V (c) 62V (d) 100V (e) 0V
3. 10kΩ 电阻开路。

例题中相关问题答案

例 6-1 附加的电阻与 R_4 和 $R_2 \| R_3$ 的串联组合并联。

例 6-2 附加的电阻与 R_5 并联。

例 6-3 A 到地：$R_T = R_3 \| (R_1 + R_2) + R_4$
B 到地：$R_T = R_2 \| (R_1 + R_3) + R_4$
C 到地：$R_T = R_4$

例 6-4 没有影响，新电阻被电路中连线短路。

例 6-5 55.1Ω

例 6-6 128.3Ω

例 6-7 $I_1 = 8.93\text{mA}$；$I_3 = 5.85\text{mA}$；$I_T = 18.2\text{mA}$

例 6-8 $V_1 = V_2 = 10.3\text{V}$；$V_3 = 9.70\text{V}$；$V_4 = 3.16\text{V}$；$V_5 = 6.54\text{V}$

例 6-9 $I_1 = 1.42\text{mA}$，$P_1 = 6.67\text{mW}$；
$I_2 = 756\mu\text{A}$，$P_2 = 3.55\text{mW}$；
$I_3 = 2.18\text{mA}$，$P_3 = 4.75\text{mW}$；
$I_4 = 1.13\text{mA}$，$P_4 = 1.28\text{mW}$；
$I_5 = 1.06\text{mA}$，$P_5 = 758\mu\text{W}$；
$I_6 = 1.06\text{mA}$，$P_6 = 435\mu\text{W}$

例 6-10 3.39V

例 6-11 由于对电路的负载效应小，所以电流将增大，R_{L2} 中新的电流为 59μA。

例 6-12 5.19V

例 6-13 3.3kΩ

例 6-14 0.49V

例 6-15 2.36V；124Ω

例 6-16 $V_{TH(AB)} = 3.46\text{V}$；$R_{TH(AB)} = 3.08\text{k}\Omega$

例 6-17 1.17mA

例 6-18 41.7mW

例 6-19 22.0mA

例 6-20 5mA

例 6-21 5.73V，0V

例 6-22 9.46V

例 6-23 $V_A = 12\text{V}$；$V_B = 13.8\text{V}$

是非测验题答案

1.T 2.F 3.F 4.T 5.T 6.T 7.F 8.F 9.T 10.F

自测题答案

1.（e） 2.（c） 3.（c） 4.（c） 5.（b） 6.（a） 7.（b） 8.（b） 9.（d） 10.（b）
11.（b） 12.（c） 13.（d） 14.（a） 15.（c） 16.（d）

故障排除：征兆与原因的答案

1.（c） 2.（b） 3.（c） 4.（b） 5.（a）

第7章

磁与电磁

本章目标

- 说明磁场原理
- 说明电磁原理
- 描述几种电磁器件的工作原理
- 解释磁滞现象
- 讨论电磁感应原理
- 说明直流发电机的工作原理
- 说明直流电动机的工作原理

本章引入了两个新概念：磁和电磁。多种电气设备基于磁或电磁原理进行工作，电磁感应是电感或线圈（第11章中解释）的重要基础。

磁铁分为永久磁铁和电磁铁两类。不需要外部激励永久磁铁就能在两极之间保持一个恒定的磁场，而电磁铁只有当有电流通过时才产生磁场。电磁铁基本上就是一个绕在磁心材料上的线绕线圈。本章介绍了直流发电机和直流电动机。电动机广泛应用于工业控制系统，因此了解电动机很重要。

7.1 磁场

永久磁铁周围存在磁场，磁场可用磁力线表示，磁力线从北极（N）指向南极（S），并通过磁性材料返回北极。

学习完本节内容，应该能够

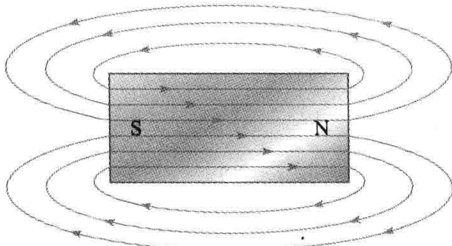
- 解释磁场原理；
- 定义磁通；
- 定义磁通密度；
- 讨论材料如何磁化；
- 解释磁性开关的工作原理。

永久磁铁周围有一个磁场，如图7-1所示的条形磁铁。所有磁场都源于固体材料内电子运动引起的电荷运动。某些像铁那样的材料其原子排列整齐，使得其中电子的运动得到加强，产生在三维方向延伸的可观察场。即使是一些电气绝缘材料也可以表现出这种行为，陶瓷能产生很好的磁性却是电气绝缘体。

为了解释并演示磁场，迈克尔·法拉第画出“磁力线”或磁通线来表示这个无法看见的场。磁力线被广泛用于描述场，表示场的强度和方向，磁力线永不交叉。磁力线密表示场强高，而磁力线稀疏则表示场强低。磁力线总是从磁铁的北极（N）指向南极（S），即使一个小的磁铁，按数学定义的磁力线数量也非常大，因此，为清楚起见，磁场中一般只画几条线。

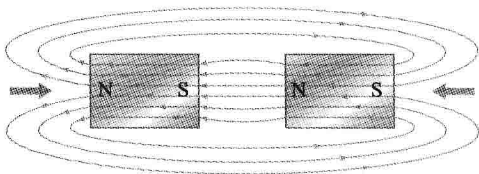
当两个永久磁铁的异性极靠近时，它们的磁场产生吸引力，如图7-2a所示；而当两个同性极靠近时，它们互相排斥，如图7-2b所示。

当纸、玻璃、木材或塑料等非磁性材料放置在磁场中时，磁力线不会发生改变，如图7-3a所示。然而，当诸如铁等磁材料放置在磁场中时，磁力线将发生改变，更趋于从铁中通过而不是从周围空气中通过，这是因为铁提供的磁路径比空气中的磁路径更容易建立，图7-3b说明了这个原理。磁力线沿着铁或其他材料中路径通过常被用来设计屏蔽层，防止杂散磁场影响敏感电路。

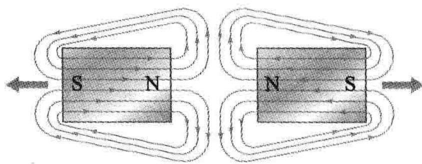


图中磁力线仅表示了磁场中大量磁力线的一部分

图 7-1 条形磁铁周围的磁力线

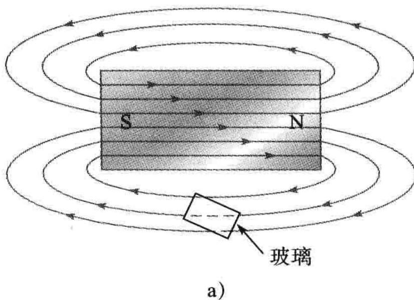


a) 异性极相吸

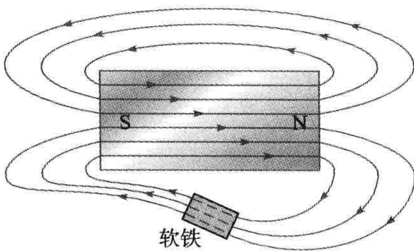


b) 同性极相斥

图 7-2 磁的吸引与排斥



a)



b)

图 7-3 磁场中非磁性和磁性材料的影响

7.1.1 磁通

磁场从北极指向南极的磁力线组称为*磁通*，用希腊字母 Φ 表示，磁场越强，表示磁场的磁力线越多。决定磁场强弱的因素有材料、物理几何形状，以及与磁体的距离。磁力线倾向于更集中在两极。

磁通的单位是*韦伯*（Wb）。1Wb 等于 10^8 条磁力线。因此，韦伯是个非常大的单位，在实际使用中常用微韦伯（μWb）做单位，1μWb 等于 100 条磁力线。

7.1.2 磁通密度

*磁通密度*表示垂直于磁场的单位面积磁通量，符号为 B，单位是*特斯拉*（T），1T=1Wb/m^2。磁通密度用下式表示

$$B=\frac{\Phi}{A} \tag{7-1}$$

式中，Φ 是磁通，单位为 Wb；A 是磁场的截面积，单位为 m^2。

【例 7-1】 比较图 7-4 所示的两个磁心中的磁通和磁通密度。该图表示磁性材料的横截面，假设每个点代表 100 条磁力线（或 1μWb）。

解： 简单地说，磁通就是磁力线的数量，图 7-4a 中为 49 个点，每点表示 1μWb，所以磁通为 49μWb，图 7-4b 中有 72 个点，所以磁通为 72μWb。

为了计算磁通密度，首先计算面积（m^2）。对于图 7-4a，面积是

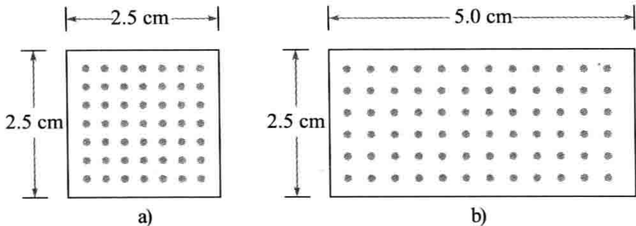


图 7-4

$$A = lw = 0.025\text{m} \times 0.025\text{m} = 6.25 \times 10^{-4}\text{m}^2$$

对于图 7-4b，面积是

$$A = lw = 0.025\text{m} \times 0.050\text{m} = 1.25 \times 10^{-3}\text{m}^2$$

利用式（7-1）计算图 7-4a 的磁通密度是

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{49\mu\text{Wb}}{6.25 \times 10^{-4}\text{m}^2} = 78.4 \times 10^{-3}\text{Wb/m}^2 = 78.4 \times 10^{-3}\text{T}$$

图 7-4b 的磁通密度是

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{72\mu\text{Wb}}{1.25 \times 10^{-3}\text{m}^2} = 57.6 \times 10^{-3}\text{Wb/m}^2 = 57.6 \times 10^{-3}\text{T}$$

表 7-1 列出了两个磁心的数据比较，注意，磁通最大的磁心不一定具有最大的磁通密度。

表 7-1 两个磁心的数据

	磁通/Wb	面积/m²	磁通密度/T		磁通/Wb	面积/m²	磁通密度/T
图 7-4a	49×10^{-6}	6.25×10^{-4}	78.4×10^{-3}	图 7-4b	72×10^{-6}	1.25×10^{-3}	57.6×10^{-3}

相关问题：如图 7-4a 所示，如果同样的磁通是在一个 5.0cm×5.0cm 的磁心中，试问磁通密度是多少？

【例 7-2】 如果某磁性材料中的磁通密度为 0.23T，材料面积为 0.38in²，试问通过该材料的磁通是多少？

解：首先，必须将 0.38in² 转换为平方米。39.37in=1m，因此

$$A = 0.38\text{in}^2 \times [1\text{m}^2/(39.37\text{in})^2] = 245 \times 10^{-6}\text{m}^2$$

通过该材料的磁通为

$$\Phi = BA = 0.23\text{T} \times 245 \times 10^{-6}\text{m}^2 = 56.4\mu\text{Wb}$$

相关问题：如果 $A = 0.05\ \text{in}^2$ 、$\Phi = 1000\mu\text{Wb}$，试计算 B。

高斯 虽然特斯拉（T）是 SI 单位制的磁通密度单位，但是 CGS（厘米-克-秒）单位制中却使用高斯(G) 的单位(10^4G=1T)。实际用于测量磁通密度的仪器是高斯计，典型的高斯计如图 7-5 所示。这种特殊的高斯计是一种四量程便携式仪器，可以测量像地球磁场一样的弱磁场(约0.5G，但根据位置的不同而有所变化)，也可以测量像 MRI（核磁共振成像，约 10 000 G）那样的强磁场。高斯仍然是广泛使用的单位，所以高斯和特斯拉我们都应该熟悉。

7.1.3 材料的磁化过程

把铁、镍、钴等铁磁材料放置到磁铁的磁场中时，它们将被磁化。我们都看到过永久磁铁吸起回形针、钉或铁屑的现象，这时，在永久磁场的影响下被吸的对象被磁化了（也即它本身实际上也变成了磁铁），被吸引到磁铁上，磁场移去后，该对象趋于失去磁性。

磁性材料不仅影响两极的磁通密度，而且会改变磁通密度随着离开两极距离的增加而减弱的方式。材料的物理尺寸同样也会影响磁通密度。例如，两个盘形磁铁（均由烧结的铝镍钴磁

钢制成），极点附近的密度非常相似，但是，远离磁极的地方较大磁铁具有更高的磁通密度，如图 7-6 所示。注意，离开磁极后磁通密度迅速下降。这种图示能够说明一个给定的磁铁对于特定应用是否有效取决于磁铁作用的距离。

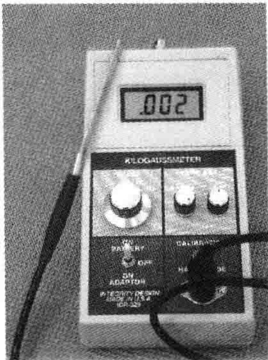


图 7-5 直流高斯计（LessEMF 公司配制的集成型 IDR-329）

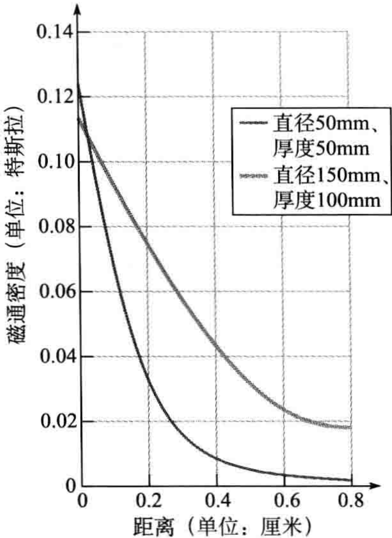
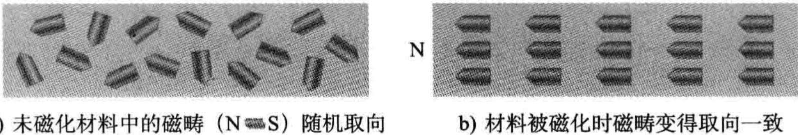


图 7-6 两个盘形磁铁的磁通密度是距离的函数举例，粗曲线表示大的磁铁

由于轨道运动和电子自旋，铁磁材料原子结构内含有大量微小的磁畴，这些磁畴可以被认为是具有南北两极的很小的条形磁铁。材料不暴露于外部磁场时，其磁畴是随机取向的，如图 7-7a 所示。当材料被置于磁场中时，其磁畴取向一致，如图 7-7b 所示。因此，该材料本身有效地成为一个磁铁。



a) 未磁化材料中的磁畴（N S）随机取向　　b) 材料被磁化时磁畴变得取向一致

图 7-7 未磁化和磁化材料中的铁磁畴

材料类型是影响实际磁铁磁通密度的一个重要因素。表 7-2 列出了典型磁场的磁通密度（单位：T）。对于永久磁铁，给出的数字基于在其磁极附近测量的磁通密度。正如前面所讨论的，这些值随着离开磁极的距离增加将迅速下降。人们在做核磁共振成像检查时，遇到的最强磁场大约为 1T（10 000G），市场上出售的最强的永久磁铁是钕-铁-硼的复合材料（NdFeB，钕铁硼）。为了求磁通密度的高斯值，需在特斯拉值上乘以 10^4。

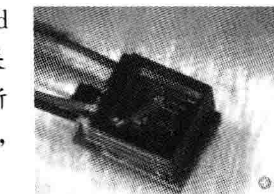
表 7-2 几种磁场的磁通密度

源	典型磁通密度/T	源	典型磁通密度/T
地球磁场	4×10^{-5}（随位置变化）	小“冰箱”磁铁	0.08～0.1
陶瓷磁铁	0.2～0.3	铝镍钴磁钢 5 磁簧开关磁铁	0.1～0.2
钕磁铁	0.3～0.52	核磁共振成像（MRI）	1
曾在实验室实现的最强恒定磁场	45		

安全提示 许多强力磁铁非常脆弱，碰撞后容易打破，因此，在使用强的磁铁时，必须戴眼罩以保护眼睛。强磁铁不是玩具，不能给孩子玩。装有心脏起搏器的人应远离强磁场环境。

系统注释 灵敏的磁传感器

美国国家标准与技术研究所（National Institute of Standards and Technology，NIST）开发了一种新型传感器，能感测与人心跳相关的非常微弱的磁场，测得的心脏磁签为皮特斯拉级（万亿分之一特斯拉），比地球磁场小一百万倍。测量必须在磁屏蔽的建筑物内进行，以排除地球磁场的影响。


图片由 S. knappe/NIST 提供

这种微型传感器最终可能作为心电图的补充应用在心磁测量中。

7.1.4 应用

永久磁铁广泛用于无刷电动机（7.7 节讨论）、磁性离合器、扬声器、麦克风、汽车和磁共振成像设备，也常用在开关中，例如图 7-8 所示的常闭开关。当磁铁接近开关机构时开关闭合，如图 7-8a 所示；当磁铁移开时弹簧拉臂打开，如图 7-8b 所示。磁性开关广泛用于安全系统中。

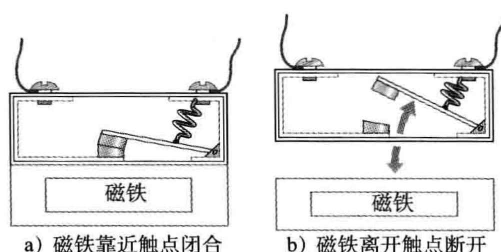


图 7-8 磁性开关的操作

系统注释 磁性开关的系统应用

磁性开关在系统中得到广泛使用，一个重要应用是接近检测器，用来对旋转机械进行计数操作或测量其移动的速度。簧式磁性开关（简称簧式开关）感测随旋转机械运动的磁铁，磁簧开关每秒可以开、合 1000 次，预期寿命达三十亿个周期。

磁性开关还被用在浮法探测器中监测液位，浮子上有一个磁铁，随液体向上和向下移动，磁铁通过开关时，簧片被拉到一起闭合开关。

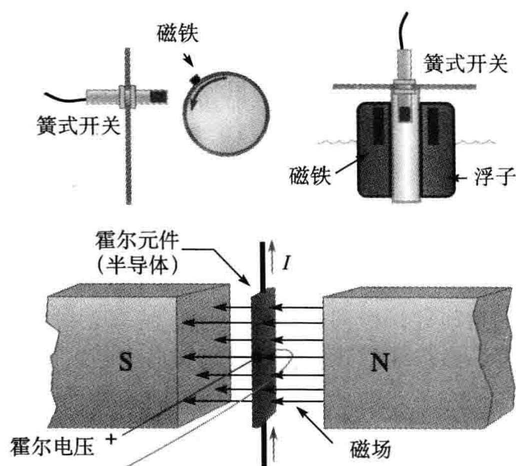


图 7-9 霍尔效应。霍尔元件两端感应霍尔电压

永久磁铁的另一个重要应用是在利用霍尔效应的传感器中。霍尔效应是在磁场中薄的通电导体或半导体（霍尔元件）两个对侧产生一个小电压（几微伏）现象。霍尔元件两端出现的电压称为霍尔电压，如图 7-9 所示。霍尔电压是由于在磁场中移动的电子受到磁力的作用，使霍尔元件的一侧电荷过量。虽然这个效应最初是在导体中发现，但在半导体中却更明显，因此通常用半导体制作霍尔效应传感器。注意，磁场、电流和霍尔电压都彼此垂直。将霍尔电压放大可用于检测磁场的存在。磁场检测在传感器应用中非常有用。

由于其体积小、价格便宜而且没有可移动部件，霍尔效应传感器得到广泛应用。此外，它还是非接触式传感器，可以反复操作数十亿次，与接触式传感器相比具有明显的优势。通过检测磁场，霍尔效应传感器可以检测附近是否存在磁铁，因而可用来进行位置测量或感测运动。霍尔效应传感器可与其他传感元件结合测量电流、温度或压力。

许多系统中使用霍尔效应传感器。在汽车中，用霍尔效应传感器测量各种参数，如节流阀

角度、曲轴和凸轮轴位置、配电器位置、转速表、动力座椅和后视反射镜的位置等。霍尔效应传感器的其他应用包括测量旋转设备参数，如钻孔机、风机、流量计叶片和磁盘速度检测。霍尔效应传感器还可用在直流电动机中（将在7.7节介绍）。

本节测试题

1. 当两个磁铁的北极靠近时，它们是相互吸引还是排斥？
2. 磁通与磁通密度之间的区别是什么？
3. 测量磁通密度的两个单位是什么？
4. 当 $\Phi=4.5\mu\text{Wb}$，$A=5\times10^{-3}\,\text{m}^2$ 时，试问磁通密度是多少？

7.2 电磁现象

电磁现象就是由导体中的电流产生磁场。

学习完本节内容，应该能够

- 解释电磁原理；
- 确定磁力线方向；
- 定义磁导率；
- 定义磁阻；
- 定义磁动势；
- 描述基本电磁铁。

电流在导体周围产生磁场，称为**电磁场**，如图7-10所示。看不见的磁力线在导体的周围形成同心圆图案，并沿导体长度方向连续分布。对于图中给定的电流方向，导体周围的磁力线方向如图所示，磁力线为顺时针方向。若电流方向反转，磁力线则为逆时针方向。

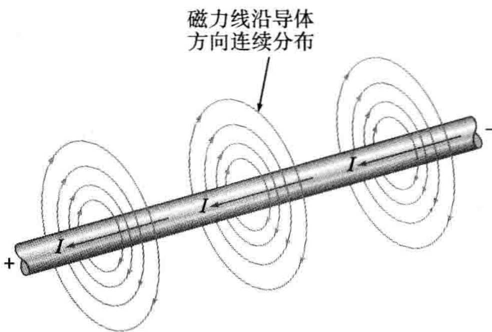


图7-10 载流导体周围的磁场。导体中箭头指示电子流动方向（从−到+）

虽然我们看不见磁场，但磁场能够产生可视的效应。例如，如果载流导线垂直穿过一张纸，在纸的表面放置的铁屑将沿磁力线按同心环排列，如图7-11a所示。图7-11b显示了在电磁场中放置的指南针将指向磁力线方向。越靠近导体磁场越强，磁场随离导体的距离增加而变弱。

左手定则 记忆磁力线方向的辅助方法如图7-12所示。设想用左手握住导体，拇指指向电流的方向，则四指所指的方向即磁力线的方向。

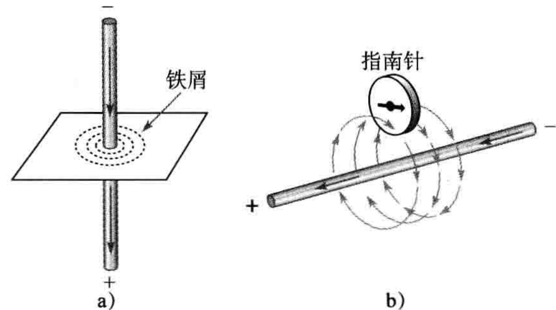


图7-11 电磁场的可视效应

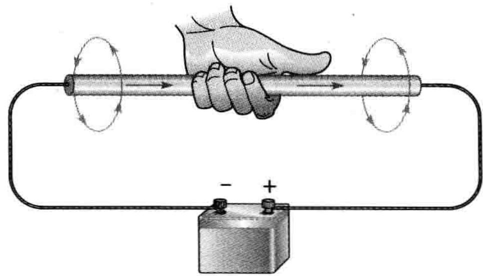


图7-12 左手定则演示。左手定则用于电子流动的电流（从−到+）

7.2.1 电磁特性

现在讨论与电磁场相关的几个重要特性。

磁导率（μ）　材料中建立磁场的容易程度用磁导率度量。磁导率越高，磁场越容易建立。磁导率用希腊字母 μ 表示。

磁导率由材料的类型决定，真空磁导率（μ_0）为 $4\pi\times10^{-7}$ Wb/A・m（韦伯/安・米），用做参考量。铁磁材料的典型磁导率是真空磁导率的数百倍，表明在这些材料中比较容易建立磁场。铁磁材料包括铁、钢、镍、钴及它们的合金。

材料的相对磁导率（μ_r）为绝对磁导率（μ）与真空磁导率（μ_0）的比值。

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{7-2}$$

由于这是一个比值，因此 μ_r 没有单位。典型的磁性材料，如铁，相对磁导率为数百，高导磁材料的磁导率可达 100 000。

磁阻（R_m）　材料中阻碍建立磁场的能力称为磁阻（R_m）。磁阻的数值与磁路的长度（l）成正比，与材料的磁导率（μ）和截面积（A）成反比，可用下式表示

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \tag{7-3}$$

磁路中磁阻类似于电路中的电阻。l 用米表示，A（面积）用平方米表示，μ 用 Wb/A・m 表示，磁阻的单位可以推导如下：

$$R_m = \frac{l}{\mu A} = \frac{\text{m}}{(\text{Wb/A}\cdot\text{m})(\text{m}^2)} = \frac{\text{A}}{\text{Wb}}$$

A/Wb 为安培/韦伯。

式（7-3）与导线电阻的推导式（2-6）相似。回顾式（2-6）

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

电阻率（ρ）的倒数是电导率（σ），用 $1/\sigma$ 替代 ρ，式（2-6）可写成

$$R = \frac{l}{\sigma A}$$

比较导线电阻的最后这个式子和式（7-3），两个式子中长度（l）与面积（A）意义相同，电路中的电导率（σ）类似于磁路中的磁导率（μ）；同样，电路中的电阻（R）类似于磁路中的磁阻（R_m），两者都是阻力。根据材料的种类和尺寸，磁路中典型的磁阻为 50 000A/Wb 以上。

【例 7-3】　试计算由低碳钢制成的圆环（环形铁心）的磁阻，圆环的内径为 1.75cm，外径为 2.25cm，假设低碳钢的磁导率为 2×10^{-4} Wb/A・m。

解： 计算长度和面积之前必须先将厘米转换成米。根据给定的尺寸，厚度 0.5cm＝0.005m，因此，截面积为

$$A = \pi r^2 = \pi\times(0.0025)^2 = 1.96\times10^{-5}\text{m}^2$$

长度等于用平均半径 2.0cm 或 0.020m 计算的圆环周长。

$$l = C = 2\pi r = 2\pi\times0.020\text{m} = 0.125\text{m}$$

将数值代入到式（7-3）中

$$\Re = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.125\text{m}}{(2\times10^{-4}\text{Wb/A}\cdot\text{m})\times(1.96\times10^{-5}\text{m}^2)} = 31.9\times10^6\,\text{A/Wb}$$

相关问题：如果用磁导率为 5×10^{-4} Wb/A・m 的铸钢替换铸铁心，试问磁阻会发生什么

变化？

【例 7-4】 软钢的相对磁导率为 800，试计算长度为 10cm、截面积为 1.0cm×1.2cm 的软钢心的磁阻。

解： 首先确定软钢心的磁导率

$$\mu = \mu_0\mu_r = (4\pi\times10^{-7}\,\mathrm{Wb/A\cdot m})\times800 = 1.00\times10^{-3}\,\mathrm{Wb/A\cdot m}$$

然后将长度转换成米，面积转换成平方米

$$l = 10\mathrm{cm} = 0.10\mathrm{m}$$

$$A = 0.010\mathrm{m}\times0.012\mathrm{m} = 1.2\times10^{-4}\,\mathrm{m}^2$$

将数值代入到式（7-3）中

$$R_m = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.10\mathrm{m}}{(1.00\times10^{-3}\,\mathrm{Wb/A\cdot m})\times(1.2\times10^{-4}\,\mathrm{m}^2)} = 8.33\times10^5\,\mathrm{A/Wb}$$

相关问题：如果磁心由相对磁导率为 4000 的坡莫合金制成，试问磁阻会如何变化？

磁动势（mmf） 我们知道，导体中的电流会产生磁场，我们把产生磁场的原动力称为磁动势（magnetomotive force，mmf）。其实磁动势物理意义上并不是真正的动力，而只是电荷运动（电流）的直接结果。磁动势的单位为安培（ampere，A）也是基于线圈中电流建立的。磁动势公式为

$$F_m = NI \tag{7-4}$$

式中，F_m为磁动势，N 为导线的匝数，I 为电流（单位为安培）。

图 7-13 显示了绕在磁性材料上的若干匝载流导线产生的磁动势在磁路中建立起磁通线的过程。磁通量取决于磁动势和材料的磁阻的大小，可写成下列表达式：

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} \tag{7-5}$$

式（7-5）就是关于电磁路的欧姆定律，磁通（Φ）与电流类似，磁动势（F_m）与电压类似，磁阻（R_m）与电阻类似。像其他科学现象一样，磁通是一种效应，磁动势是一个动力，磁阻则是阻力。

电路与磁路的一个重要区别是，式（7-5）是仅适用于磁性材料饱和（磁通变为最大）前的某一点，这在 7.4 节中的磁化曲线可以看到。另一个区别是，永久磁铁的磁通并没有磁动势源，永久磁铁的磁通是由内部电子运动形成的，而不是由外部电流形成，这在电路中没有与之相等效的情况。

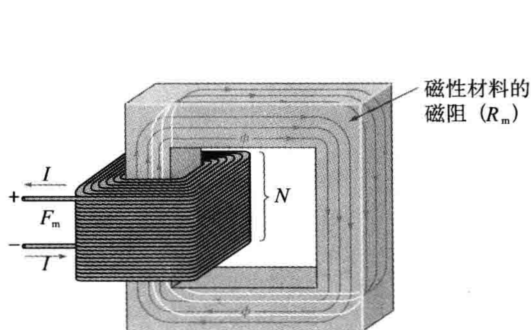


图 7-13 基本电磁电路

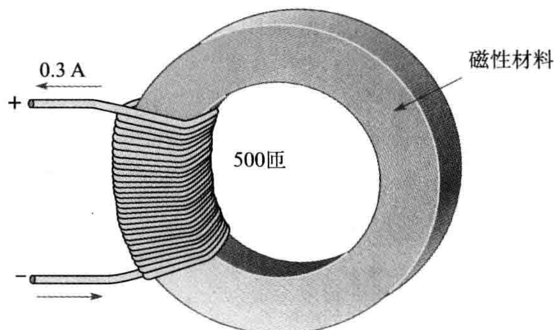


图 7-14

【例 7-5】 如果材料的磁阻为 2.8×10⁵A/Wb，试问图 7-14 所示的磁路中建立的磁通为多大？

解： $$\Phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{NI}{R_m} = \frac{500t \times 0.3A}{2.8 \times 10^5 At/Wb} = 5.36 \times 10^{-4} Wb = 536\mu Wb$$

相关问题：如果磁阻为 7.5×10^3 A/Wb、匝数为 300、电流为 0.18A，试问图 7-14 所示的磁路中建立的磁通为多大？

【例 7-6】 400 匝的线圈中流过的电流为 0.1A。试问

(a) 磁动势为多少？(b) 如果磁通为 250μWb，磁路的磁阻为多大？

解： (a) $N = 400, I = 0.1A, F_m = NI = 400 \times 0.1A = 40A$

(b) $R = \frac{F_m}{\Phi} = \frac{40A}{250\mu Wb} = 1.60 \times 10^5 A/Wb$

相关问题：对 $I = 85mA$、$N = 500$、$\Phi = 500\mu Wb$ 重做例题。

许多磁电路中磁心不是连续的，例如，如果在磁心中插入空气间隙，会增大磁路的磁阻，这意味着建立同样的磁通就需要更大的电流，因为空气间隙是建立磁通的重要阻力。这种情况类似于串联电路，磁路的总磁阻为磁心磁阻与气隙磁阻之和。

7.2.2 电磁铁

电磁铁具有刚刚介绍的特性，简单地说，一个基本电磁铁就是绕在极易被磁化的磁心上的线圈。

根据应用的需要电磁铁可设计成各种形状，例如，图 7-15 所示的 U 形磁心。当线圈接到电池有电流流过时，将建立如图 7-15a 所示的磁场；如果电流方向反转，磁场方向也跟着反转，如图 7-15b 所示。北极和南极靠得越近，它们之间的空气间隙就越小，磁阻越低，磁场就越容易建立。

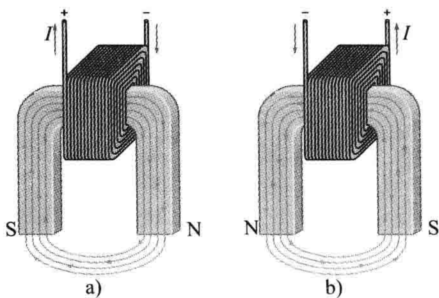


图 7-15 线圈中电流反转磁场也跟着反转

本节测试题

1. 试解释磁和电磁的区别。
2. 当流过线圈的电流反转时，电磁铁的磁场将如何变化？
3. 试说出电磁电路的欧姆定律。
4. 请将问题 3 中各个量与电路中的对应量进行比较。

7.3 电磁器件

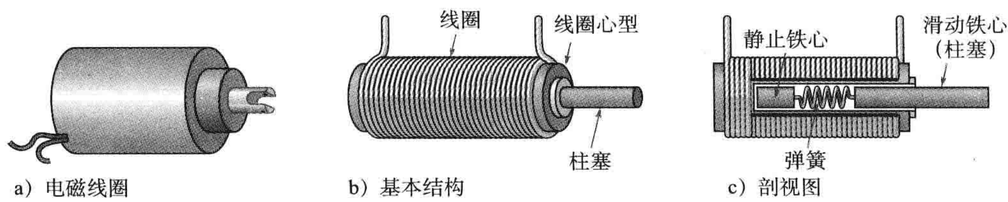
基于电磁的有用器件种类很多，如磁带录音机、电动机、扬声器、电磁阀和继电器。变压器则是另一个重要的例子，我们将在第 14 章专门讨论。

学习完本节内容，应该能够

- 描述几种电磁器件的工作原理；
- 讨论电磁线圈和电磁阀如何工作；
- 讨论继电器如何工作；
- 讨论扬声器如何工作；
- 讨论基本模拟电表机心；
- 解释磁盘和磁带的读/写操作；
- 解释磁光盘的概念。

7.3.1 电磁线圈

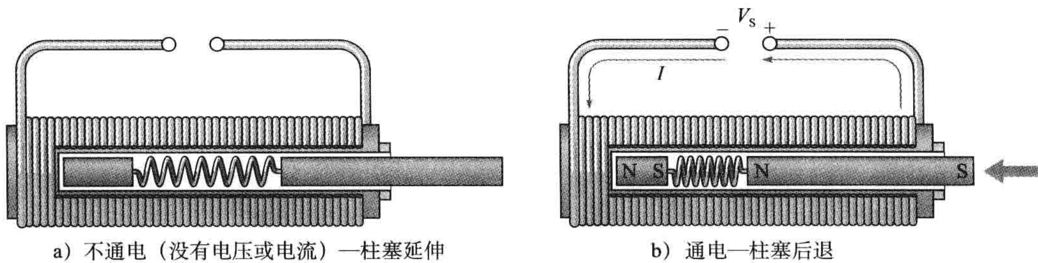
电磁线圈是一种电磁器件，它有一个称为柱塞的可移动铁心，铁心的移动取决于磁场和机械弹簧力。一个电磁线圈的基本结构如图 7-16 所示。它由绕在非磁性中空结构上的圆柱螺旋线圈构成，静止铁心被固定在轴的末端，滑动铁心通过弹簧连到固定铁心。



a）电磁线圈　　b）基本结构　　c）剖视图

图 7-16 电磁线圈基本结构

在休止（或不通电）状态下，柱塞延伸，如图 7-17a 所示。线圈通过电流使电磁线圈通电，如图 7-17b 所示。电流建立磁场并对两个铁心进行磁化，如图所示。固定铁心南极吸引滑动铁心的北极，导致滑动铁心向内运动，柱塞回缩并压缩弹簧。只要线圈中存在电流，磁场吸引力将使柱塞保持缩回状态。当电流切断时，磁场消失，压缩的弹簧把柱塞向外推。电磁线圈用于诸如打开或关闭阀门和汽车门锁。



a）不通电（没有电压或电流）—柱塞延伸　　b）通电—柱塞后退

图 7-17 基本电磁线圈操作

电磁阀 在工业控制中，电磁阀被广泛用于控制空气、水、蒸汽、油、制冷剂和其他流体。电磁阀常用在气动（空气）和液压（油）系统中作机械控制。电磁阀在航空航天和医疗等领域的应用也很普遍。电磁阀可以移动柱塞打开或关闭端口，或者将阻塞翻板旋转一个固定角度。

电磁阀由两个功能单元组成：一是提供磁场的电磁线圈，以提供所需的运动来打开或关闭阀；另一个是阀体，通过防漏密封与线圈隔离，包括管道和蝴蝶阀。图 7-18 是一种电磁阀的剖视图，当电磁阀通电时，带动蝴蝶阀打开常闭（NC）阀或关闭常开（NO）阀。

电磁阀配置种类繁多，包括常开或常闭阀，常根据流体类型（如气体或水）、压力、通道数量、尺寸等来标定。同一个电磁阀可以控制多条线，可以有多个电磁线圈移动。

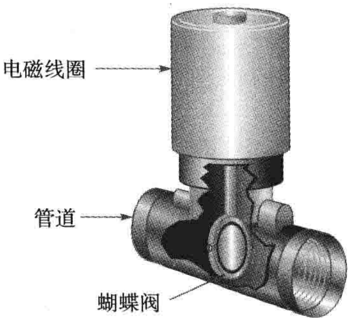


图 7-18 电磁阀基本结构

7.3.2 继电器

继电器不同于电磁线圈，它利用电磁作用断开或闭合电气触点，而不是提供机械运动。图 7-19 显示了带有一个常开（NO）触点和一个常闭（NC）触点（单刀双掷）的电枢式继电器基本操作，线圈中没有电流时，由于弹簧的作用，电枢保持与上部接触，接通 1 端到 2 端，如图 7-19a 所示。当线圈通电时，由于电磁场的吸引力电枢被拉下并与下部接触，接通 1 端和 3 端，如图 7-19b 所示。

一个典型的电枢式继电器及其原理图符号如图 7-20 所示。

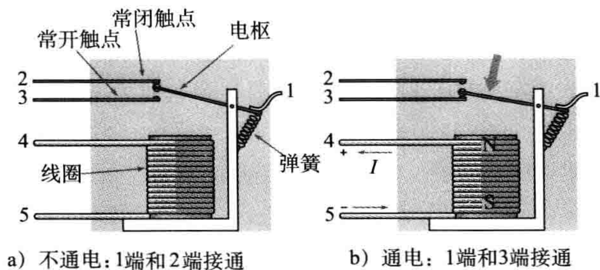


图 7-19 单刀双掷电枢式继电器的基本结构

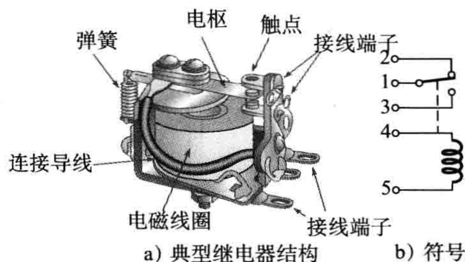


图 7-20 典型电枢式继电器

另一类广泛使用的继电器是舌簧继电器，如图 7-21 所示。舌簧继电器像电枢继电器一样使用电磁线圈。触头是由磁性材料制成的薄簧片，通常位于线圈内部。当线圈中没有电流时，簧片在打开的位置，如图 7-21b 所示。当有电流流过线圈时，簧片被磁化并相互吸引而接触，如图 7-21c 所示。

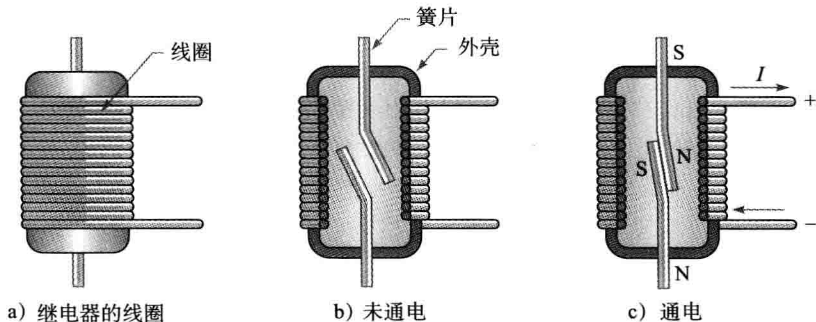


图 7-21 舌簧继电器的基本结构

舌簧继电器比电枢式继电器速度快、可靠、接触电弧小，但载流能力差，且容易受到机械冲击的影响。

系统举例 7-1 报警系统

图 7-22 显示了一个简单的入侵检测系统，使用一个继电器打开声音报警及灯光。继电器使用电池供电，即使在交流电源已关闭时仍能工作并发出报警声。该继电器闭合使用 50mA 电流，发出声光报警从电池吸取 2 A 电流。注意继电器触点物理接触，为了读图清晰，原理图上把触点画得稍稍分离。系统处于运行状态时，若任一磁检测开关闭合，继电器通电，给声音报警提供电流并接通交流电源。该系统的设计使声音报警的高电流不通过检测开关，大多数磁开关都是低电流设备，因此由继电器提供高电流输出路径。

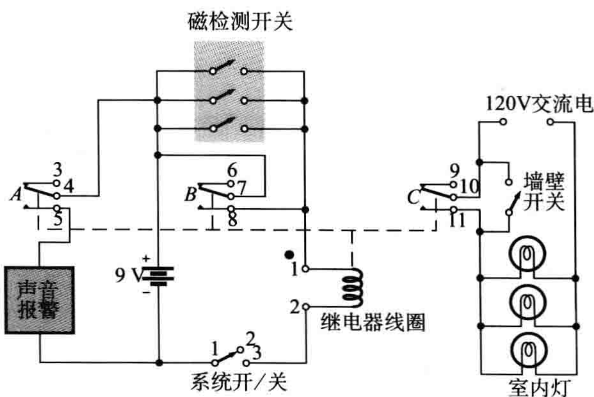


图 7-22 简化安全报警系统

7.3.3 扬声器

扬声器是一种将电信号转换成声音的电磁器件。本质上，扬声器就是一种线性电动机，电磁铁交替地吸引和排斥称为环形磁铁的永久磁铁。图 7-23 显示了一个扬声器的关键部件。用非常柔软的导线将音频信号接到称为音圈的圆筒状线圈，音圈和可动铁心形成电磁铁，悬浮在手风琴状结构的音圈纸架上，音圈纸架的作用就像手风琴弹簧，保持音圈位于中心，没有输入信号时恢复到静止位置。

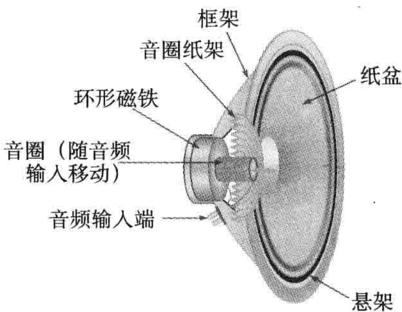


图 7-23 扬声器的关键部件（剖视图）

音频输入电流交替地来回流动并给电磁铁提供功率，电流越大，吸引或排斥力越大，输入电流反转方向，电磁铁的极性也随输入信号反转方向。音圈及其活动磁铁被牢固地连接到纸盆上。纸盆是一种柔性膜片，它的振动产生声音。

7.3.4 电表机心

达松发尔（d'Arsonval）电表机心是模拟万用表中最常见的一种，这种电表机心其指针偏转与通过线圈的电流成比例，图 7-24 显示了达松发尔电表机心的基本结构，它由安装在轴承支架组件上放置在永久磁铁磁极之间的线圈构成，指针连接到转动组件上。没有电流流过线圈时，弹簧机构将指针保持在最左边（零）位置。有电流流过线圈时，电磁力作用在线圈上，使之向右侧旋转，旋转量由电流的大小决定。

图 7-25 显示了磁场如何相互作用产生线圈组件的旋转，线圈电流流向纸内用“圆内加叉”表示，向外用“圆内加点”表示。内向电流产生逆时针的电磁场，增强其下的永久磁场，在线圈左侧产生一个如图所示向上的力，线圈右侧电流流向外，产生一个向下的力。两个力作用于线圈组件克服弹簧机构反作用力，使线圈组件顺时针旋转，在电流值指示点电磁力与弹簧力达到平衡。除去电流，弹簧力又使指针返回到零位置。

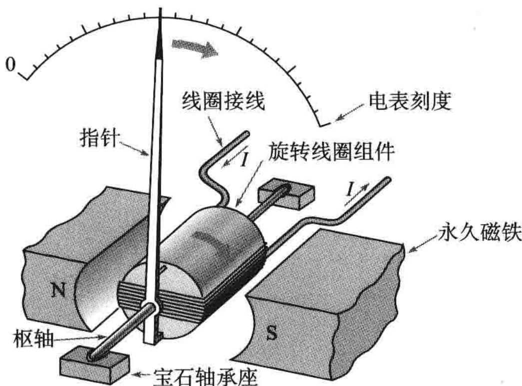


图 7-24 达松发尔电表机心的基本结构

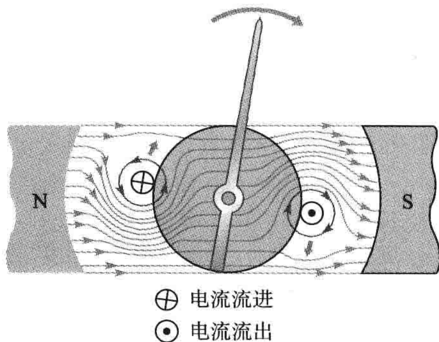
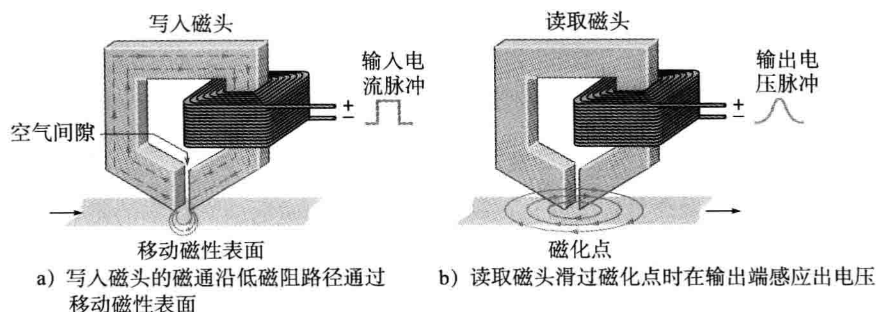


图 7-25 电磁场与永久磁场相互作用力加在旋转线圈组件上，使之顺时针旋转并带动指针偏转

7.3.5 磁盘与磁带读/写头

磁盘或磁带表面的读/写操作简化框图如图 7-26 所示。写入磁头移动到磁表面时，将一小

段磁性表面磁化，将数据位（1 或 0）写在磁性表面。磁力线方向受绕组中电流脉冲的方向控制，图 7-26a 显示的情况为正脉冲。在写入磁头的空气间隙中，磁通路经过存储装置表面，在表面按磁场方向磁化了一个小点。磁化点的一种极性代表二进制 1，另一个相反极性表示二进制 0。表面上的点一旦被磁化，将一直保持到用相反的磁场写入。



a）写入磁头的磁通沿低磁阻路径通过移动磁性表面　b）读取磁头滑过磁化点时在输出端感应出电压

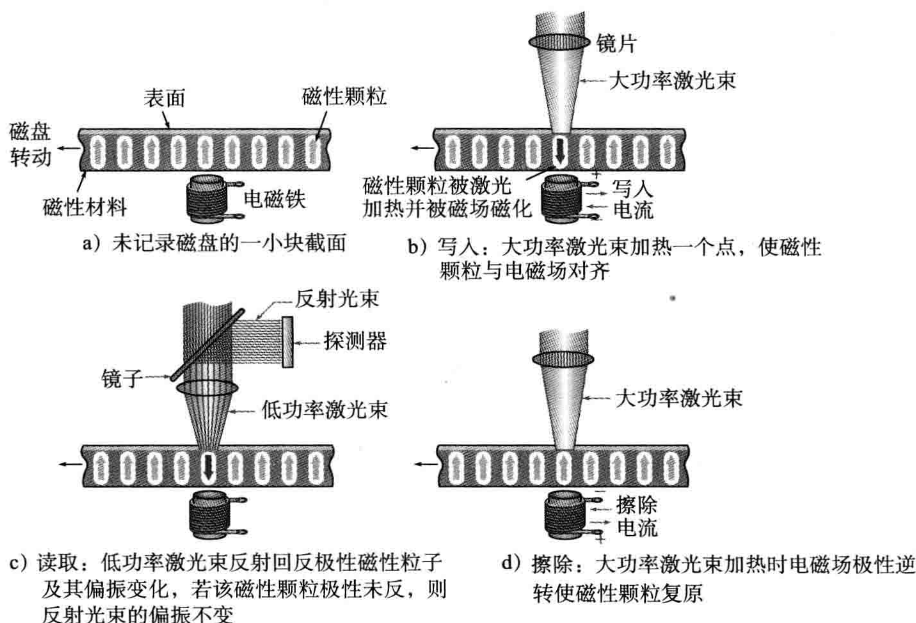
图 7-26　对磁性表面的读/写功能

当磁性表面通过读取磁头时，磁化点在读取磁头中产生磁场，在绕组中感应出电压脉冲。脉冲的极性取决于磁化点的方向，指示所存储的数据位是 1 或 0，这个过程如图 7-26b 所示。通常情况下，读取和写入磁头被组合成一个单一的单元。

7.3.6 磁光盘

磁光盘使用电磁铁和激光束在磁性表面读取和写入（记录）数据。磁光盘类似硬盘格式化为磁道和扇区，然而，由于激光束能够更精确地定位到一个非常小的光斑，磁光盘能够存储的数据量要比标准的磁性硬盘大得多。

图 7-27a 显示了磁盘在记录之前的一个小横截面区域，其下方放置一个电磁铁。图中箭头表示的微小磁性颗粒，以同一方向磁化。



a）未记录磁盘的一小块截面

b）写入：大功率激光束加热一个点，使磁性颗粒与电磁场对齐

c）读取：低功率激光束反射回反极性磁性粒子及其偏振变化，若该磁性颗粒极性未反，则反射光束的偏振不变

d）擦除：大功率激光束加热时电磁场极性逆转使磁性颗粒复原

图 7-27　磁光盘的基本内容

在磁盘上写入（记录）的过程是：通过施加与磁性颗粒方向相反的外部磁场，如图7-27b所示，然后发射大功率激光束，精确地对磁盘上存储二进制1的点加热。磁盘的材料是一种磁光合金，室温下具有高抗磁化能力，但在激光束加热的地方，其固有的磁性方向由电磁铁产生的外部磁场逆转；存储二进制0的地方，不施加激光束，磁性颗粒保持固有的向上方向。

如图7-27c所示，从磁盘上读取数据的过程是：关闭外部磁场，向读取点发射低功率激光束，如果存储的是二进制1（反向磁化），反射回的低功率激光束产生偏振位移；而如果存储的是二进制0，反射的激光束的偏振不变，探测器根据反射的激光束极性的不同确定该位读取的是1或0。

图7-27d显示了磁盘擦除过程，通过反转的外部磁场和施加的高功率的激光束，恢复每个磁性颗粒的原始方向。

本节测试题

1. 试解释电磁线圈与继电器的区别。
2. 试问电磁线圈的活动部分叫什么？
3. 试问继电器的活动部分叫什么？
4. 试问达松发尔电表机心的基本原理是什么？

7.4 磁滞

磁力作用到材料上时，材料中的磁通密度会按一定方式变化。

学习完本节内容，应该能够

- 解释磁滞现象；
- 说明磁场强度公式；
- 讨论磁滞曲线；
- 定义保磁性。

7.4.1 磁场强度

材料中的磁场强度定义为材料单位长度（l）的磁动势（F_m），如下式所示

$$H=\frac{F_m}{l} \tag{7-6}$$

式中，$F_m=NI$。磁场强度（H）的单位是每米安（A/m）。注意，磁场强度（H）由线圈的匝数（N）、通过线圈的电流（I）和材料的长度（l）确定，而与材料的种类无关。

由于$\Phi=F_m/R_m$，因此当F_m增大时，磁通增大，磁场强度也增大。回顾磁通密度（B）的定义是单位截面的磁通量（$B=\Phi/A$），所以B与H成正比。表示这两个量B和H之间关系的曲线，称为B-H曲线或磁滞曲线，影响B和H的参数如图7-28所示。

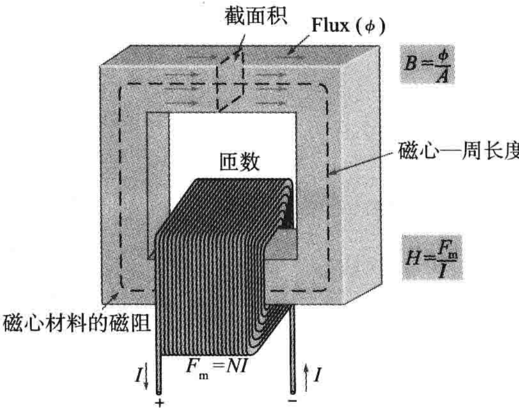


图7-28 确定磁场强度（H）和磁通密度（B）的参数

7.4.2 磁滞曲线与保磁性

磁滞是磁性材料磁化滞后于所施加的磁场强度变化的特性。改变通过线圈的电流可以很容易增大或减小磁场强度（H），并且通过反转

线圈两端电压的极性可以改变磁场强度的极性。

图 7-29 显示了磁滞曲线的演化。先假设磁心尚未磁化，因此 $B=0$。随着磁场强度（H）从零开始增大，磁通密度（B）成比例增大，如图 7-29a 中的曲线所示。当 H 达到一定值时，B 的值开始趋于平稳。随着 H 的不断增大，当 H 达到某值（H_{sat}）时 B 达到饱和值（B_{sat}），如图 7-29b 所示。一旦达到饱和，H 进一步增大，B 将不再增大。

如果 H 下降到零，B 将沿着不同的路径回落到一个剩余值（B_R），如图 7-29c 所示。这表明，尽管除去了磁场强度（$H=0$），该材料仍然继续被磁化。一旦磁化，材料在没有磁场强度时保持磁化状态的能力称为*保磁性*。材料的保磁性用 B_R 对 B_{sat} 的比值表示。

通过反转线圈中的电流得到反转的磁场强度，在曲线上用负的 H 值表示。H 在负方向增大到某个值（$-H_{sat}$）时发生饱和，此时磁通密度达到负的最大值，如图 7-29d 所示。

当除去磁场强度（$H=0$）时，磁通密度退回到负的剩余值 $-B_R$，如图 7-29e 所示。此时在正方向施加等于 H_{sat} 的磁场强度，磁通密度从 $-B_R$ 值开始沿图 7-29f 所示的曲线返回到正的最大值。

完整的 B-H 曲线如图 7-29g 所示，该曲线称为磁滞曲线。使磁通密度为零所需的磁场强度称为矫顽力，用 H_C 表示。

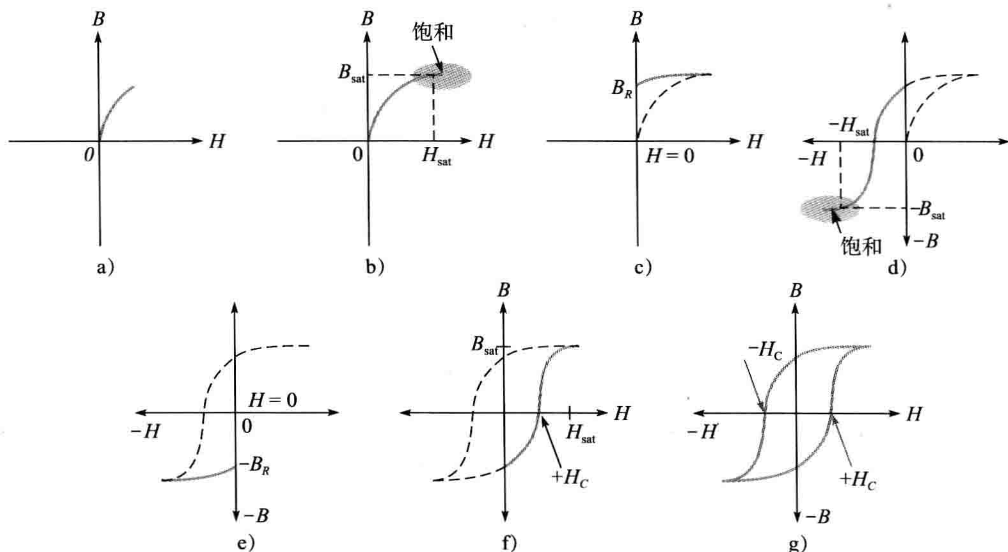


图 7-29　磁滞（B-H）曲线的演化

具有低保磁性的材料不能很好地保留磁场，而具有高保磁性材料能呈现的 B_R 非常接近 B 的饱和值。根据应用的不同，磁性材料的保磁性可能是优点也可能是缺点。例如，在永久磁铁和存储芯中，高保磁性是必需的，而在交流电动机中，保磁性则是不希望的，因为电流每次反转都必须克服残余的磁场，造成能量浪费。

本节测试题

1. 对于给定的绕线磁心，试问线圈电流增加如何影响磁通密度？
2. 请给出保磁性的定义。

7.5　电磁感应

本节介绍电磁感应，电磁感应是构造变压器、发电机、电动机和许多其他设备的基础。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论电磁感应的原理；
- 解释磁场中导体怎样感应出电压；
- 确定感应电压的极性；
- 讨论磁场中导体所受的力；
- 表述法拉第定律；
- 表述楞次定律；
- 解释曲轴位置传感器的工作原理。

7.5.1 相对运动

垂直于磁场移动直导体时，在导体和磁场之间存在相对运动。同样地，当磁场移动经过一个静止导体时，也存在相对运动。这两种情况的相对运动都在导体两端产生感应电压（v_{ind}），如图 7-30 所示。其原理就是著名的电磁感应。小写的 v 表示瞬时电压，感应电压的大小取决于导体与磁场之间相对运动的速率：相对运动越快，感应电压越大。

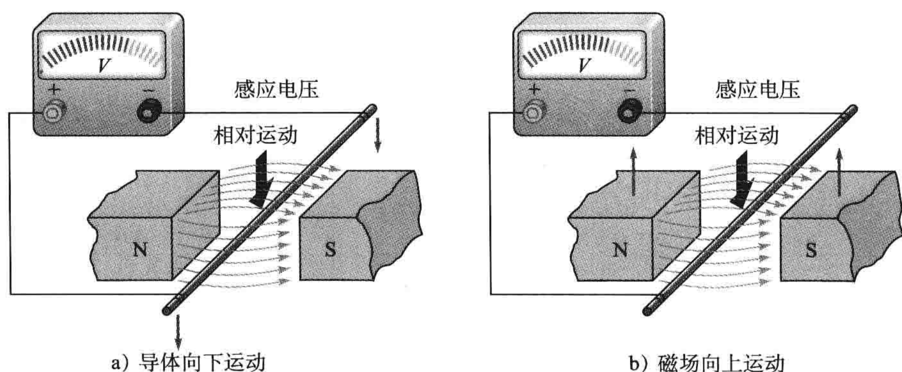
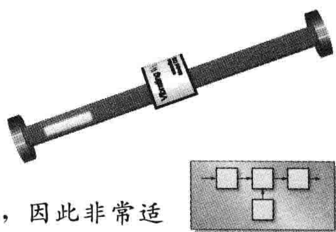


图 7-30　直导体与磁场之间的相对运动

系统注释　振弦式应变计

振弦式应变计是一种基于磁感应原理的应变计。由试管中两个塞子之间拉紧的强磁性线构成，管内传感器还有一个永久磁铁和一个拔出的线圈。



磁性线被传感器弹拔时，以自然频率振动，由线圈检测到该频率并发送到记录仪器。组件有应变，线被拉伸，改变其频率。因此，记录的频率与应变相关。由于传感器置于密封单元内，因此非常适合于潮湿环境中的系统。

7.5.2 感应电压的极性

如果图 7-30 中的导体在磁场中先向一个方向运动，然后向另一个方向运动，那么将观察到感应电压的极性逆转。当导体的相对运动向下时，感应出的电压极性如图 7-31a 所示；当导体的相对运动向上时，感应电压的极性如图 7-31b 所示。

当直导体垂直恒定磁场运动时，感应电压由下式给出

$$v_{ind} = B_{\perp} lv \tag{7-7}$$

式中，v_{ind} 是感应电压，单位为伏特（V）；$B_{\perp}$ 是磁通密度垂直于运动导体的分量，单位为特斯拉（T）；l 是暴露在磁场中的导体长度，单位为米（m）；v 是导体的运动速度，单位为米/秒（m/s）。

【例 7-7】　假设图 7-31 中导体长为 10cm，磁铁的磁极面宽为 5.0cm，磁通密度为 0.5T，导体向上运动的速度为 0.8 m/s。试问导体中感应的电压是多少？

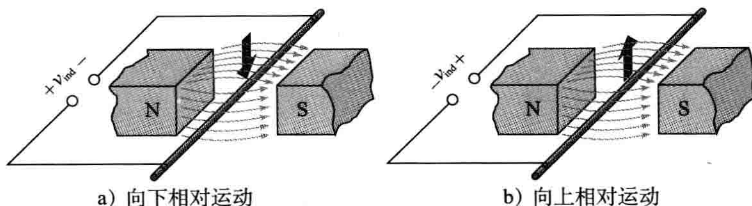


图 7-31　感应电压的极性取决于导体相对于磁场的运动方向

解： 虽然导体长度为 10cm，但由于磁极面尺寸的原因，仅有 5cm（0.05m）在磁场中，因此，

$$v_{ind} = B_{\perp} lv = 0.5\text{T} \times 0.05\text{m} \times 0.8\text{m/s} = 20\text{mV}$$

相关问题：如果速度加倍，试问感应电压是多少？

7.5.3　感应电流

当给图 7-31 中的导体接一个负载电阻，由导体和磁场之间相对运动感应的电压将在负载中形成电流，如图 7-32 所示。这个电流称为感应电流（i_{ind}），小写的 i 代表瞬时电流。

通过在磁场中移动导体产生电压并在负载中产生电流是发电机的基础，单个导体感应电流非常小，因此，实际发电机使用多匝线圈。此外，移动磁场中的导体是电路中电感概念的基础。

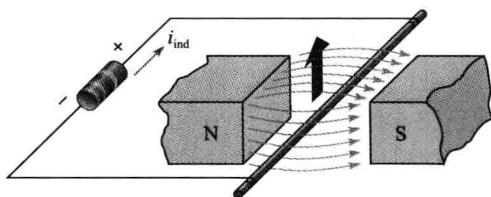


图 7-32　磁场中导体的运动在负载中产生感应电流（i_{ind}）

7.5.4　法拉第定律

迈克尔·法拉第于 1831 年发现了电磁感应原理，关键思想是一个变化的磁场在导体中感应出电压。法拉第定律有时又称为法拉第感应定律。法拉第采用线圈进行试验，该定律是前面讨论的直导体电磁感应原理的延伸。

当导体盘绕成多匝时，就有多段导体置于磁场中，可以增大感应电压。无论磁通以何种方式发生变化，都会产生感应电压。磁场的变化可以由磁场和线圈之间的相对运动引起。法拉第的观察可叙述如下：

1）线圈中感应电压的大小与磁场相对于线圈的变化率成正比。

2）线圈中感应电压的大小与线圈的匝数成正比。

法拉第第一个观察如图 7-33 所示，其中条形磁铁在线圈中移动，从而产生一个变化的磁场。在图 7-33a 中，磁铁以一定速度移动，产生一定的感应电压。在图 7-33b 中，磁铁以更快的速度在线圈中移动，产生了更大的感应电压。

法拉第的第二个观察如图 7-34 所示。在图 7-34a 中，磁铁在线圈中移动感应出所示的电压。在图 7-34b 中，磁铁以相同的速度移动，但线圈的匝数增大，线圈匝数越大感应电压越大。

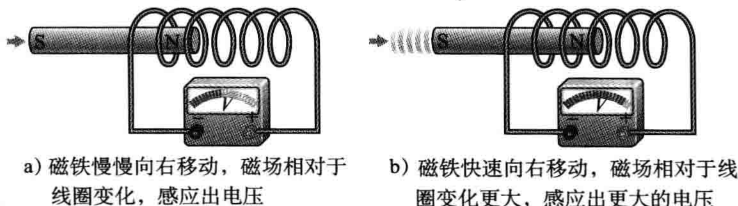
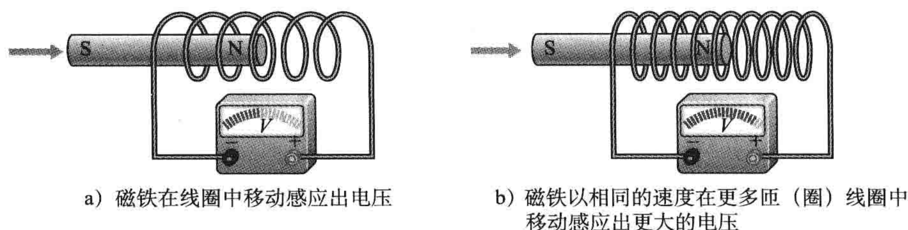


图 7-33　法拉第第一个观察演示：感应电压的量与磁场相对于线圈的变化率成正比



a）磁铁在线圈中移动感应出电压

b）磁铁以相同的速度在更多匝（圈）线圈中移动感应出更大的电压

图 7-34 法拉第第二个观察演示：感应电压的量与线圈匝数成正比

法拉第定律：线圈两端的感应电压等于线圈匝数乘以磁通变化率。

任何磁场和磁铁之间的相对运动将产生变化的磁场，将在线圈中感应出电压。即使将交流电加到电磁铁中也能感应出变化的磁场，就好像有运动。这种变化的磁场是交流电路中变压器的工作基础，这将在第 14 章介绍。

7.5.5 楞次定律

我们已经学习到，变化的磁场在一个线圈中感应出的电压与磁场变化的速率和线圈的匝数成正比，*楞次定律*定义了感应电压的极性或方向：当通过线圈的电流变化引起磁场变化时，所产生的感应电压的极性总是阻碍该电流的变化。

7.5.6 电磁感应的应用

汽车控制系统包含大量的传感器，为了获得最佳的发动机性能，需要知道曲轴的位置和速度来控制发动机的点火时刻、燃料混合、转速表和防抱死制动系统。最常用的感测曲轴（或凸轮轴）位置方法是用已在 7.1 节讨论过的霍尔效应传感器。

另一广泛使用的方法是，当金属标签在磁性组件的空气间隙移动时检测磁场的变化，基本内容如图 7-35 所示。带有凸出标签的钢盘连接到曲轴的一端，随着曲轴转动，标签移动通过磁场，钢具有比空气低得多的磁阻，所以，当标签通过空气间隙时，磁通增大，磁通的变化在线圈两端感应出电压，表示了曲轴的位置。

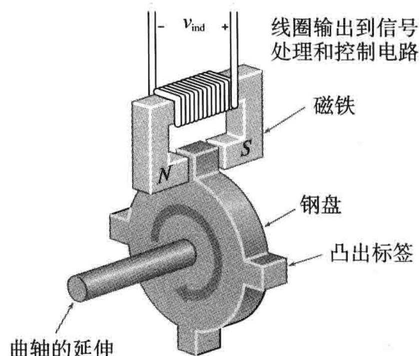


图 7-35 曲轴位置传感器，当标签通过磁铁气隙时传感器产生电压

7.5.7 磁场中载流导体的受力

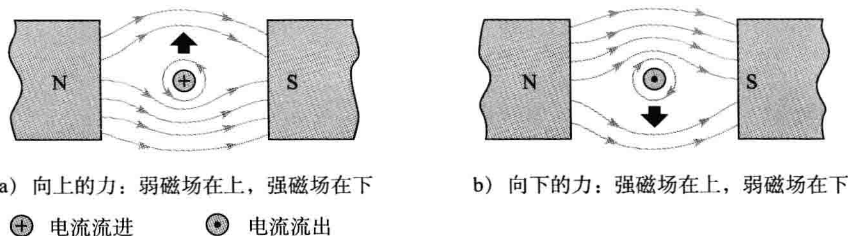
图 7-36a 显示磁场中导线电流内指向，由电流建立的电磁场与永久磁场相互作用，因为它们的方向与电磁力线相反，结果使导线上方的永久磁力线被向下偏转，因此，上方磁通密度降低、磁场减弱，而导线下方的磁通密度增加、磁场加强。导体受到一个向上的力将其推向较弱的磁场。图 7-36b 显示磁场中导线电流指向外，结果导体受到向下的力。这种导体所受的向上和向下的力就是电动机的基础。

载流导体所受的力由下式给出

$$F = BIl \tag{7-8}$$

式中，F 是受力，单位为牛顿（N）；B 是磁通密度，单位为特斯拉（T）；I 是电流、单位为安培（A）；l 是导体在磁场中的长度，单位为米（m）。

【例 7-8】 假设磁极面为边长 3.0cm 的正方形，垂直于导体的磁场磁通密度为 0.35 T，求载有 2 A 电流的导体所受的力。



a）向上的力：弱磁场在上，强磁场在下　　b）向下的力：强磁场在上，弱磁场在下

⊕ 电流流进　　⊙ 电流流出

图 7-36　磁场中载流导体的受力

解： 导体暴露在磁通中的长度是 3.0cm（0.03m），因此，

$$F = BIl = 0.35\text{T} \times 2.0\text{A} \times 0.03\text{m} = 0.21\text{N}$$

相关问题：如果磁场的方向向上（沿 Y 轴），电流（电子流动）指向内（沿 Z 轴），试问力的方向是什么？

本节测试题

1. 试问静止磁场中静止导体两端的感应电压是多少？
2. 当导体在磁场中移动的速率增加时，试问感应电压是增大、减小还是保持不变？
3. 当有电流通过磁场中的导体时，会发生什么情况？
4. 曲轴位置传感器中带凸出标签的钢盘已停在磁铁的空气间隙中，试问感应电压是多少？

7.6　直流发电机

直流发电机产生的电压与磁通和电枢旋转速度成正比。

学习完本节内容，应该能够

- 解释直流发电机的工作原理；
- 画出自激并励直流发电机的等效电路；
- 讨论直流发电机的部件。

图 7-37 显示了一个极简化的直流发电机，它由在磁场中旋转的单圈导线组成。注意，导线圈的每一端都连接到一个裂环装置，这个导电金属环称为换向器。随着导线回路在磁场中旋转，换向器裂环也旋转。裂环的每一半分别摩擦固定触点（称为电刷），并将导线连接到外部电路。

在外部机械力的带动下，导线环路在磁场中旋转，以不同角度切割磁力线，如图7-38 所示。旋转到位置 A 时，导线环的有效移动与磁场平行，因此这个时刻切割磁力线的速率为零。导线环从位置 A 旋转到位置 B 时，切割磁力线的速度越来越快，在位置 B 时，导线环的有效移动垂直于磁场，切割磁力线数最大。导线环从位置 B 旋转到位置 C 时，切割磁力线的速率逐渐减小，在 C 点达到最小（零）。导线环从位置 C 旋转到位置 D 时，切割磁力线的速率逐步增大，至 D 点最大，然后再次返回到最低点 A。

我们已经知道，导线在磁场中移动将感应出电压，根据法拉第定律，感应电压的大小与导线的环数（匝数）和它相对于磁场的移动速率成正比。导线移动相对于磁感应线的角度决定着感应电压的大小，因为导线切割磁力线的速率与运动的角度相关。

图 7-39 显示了单导线环在磁场中旋转如何在外部电路产生感应电压的过程。假设导线环处于瞬时水平位置，因此感应电压为零，随着导线环继续旋转，在位置 B 建立的感应电压最大，如图 7-39a 所示；当导线环继续从 B 向 C 旋转，感应电压逐步减小，在 C 点减小到零，如图 7-39b 所示。

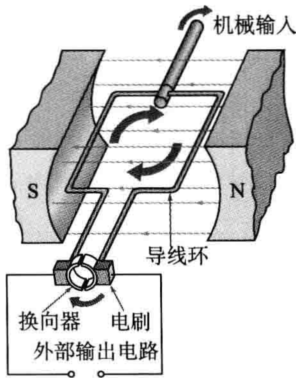


图 7-37 简化的直流发电机

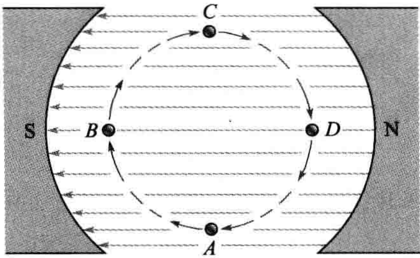
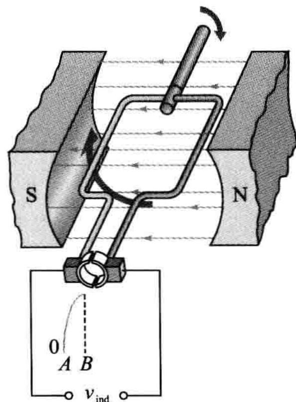
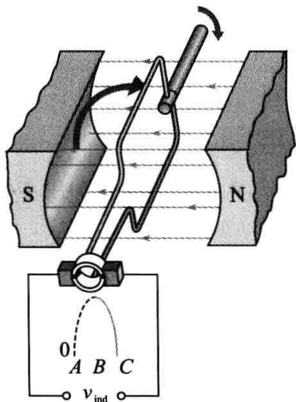


图 7-38 导线环切割磁力线的端视图

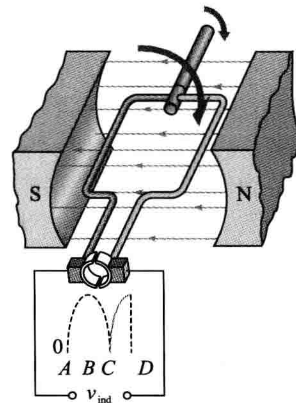
旋转第二个半周时如图 7-39c 和图 7-39d 所示，电刷切换到换向器相对部分，所以在输出端的电压极性仍然保持相同，导线环从位置 C 向 D 转动，然后再回到 A，感应电压也从 C 点的零逐步增大到 D 点的最大，再逐步减小到 A 点的零。



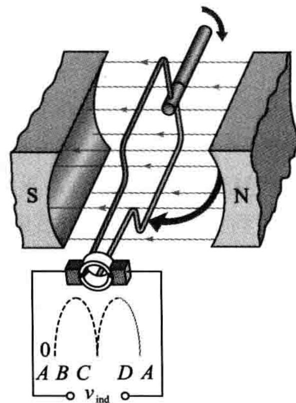
位置 B：导线环运动垂直于磁力线，电压最大



位置 C：导线环运动平行于磁力线，电压为零



位置 D：导线环运动垂直于磁力线，电压最大



位置 A：导线环运动平行于磁力线，电压为零

图 7-39 直流发电机的基本工作原理

图7-40显示了直流发电机中感应电压随导线环旋转若干周（本例为三周）的变化，因为它的极性不改变，所以这是一个直流电压，然而，该电压在零和最大值之间脉动。

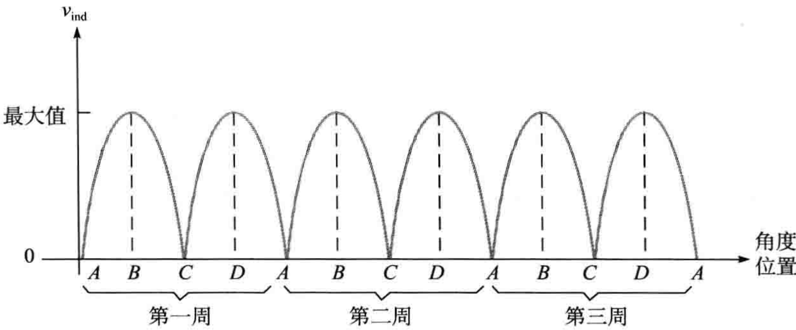


图7-40 直流发电机中导线环旋转三周的感应电压

在实际发电机中，将多个线圈压入到铁磁性心组件的插槽中，整个组件（称为转子）连接到轴承并在磁场中旋转。图7-41是一个没有显示线圈的转子铁心图，换向器分成若干段，每一对与一个线圈的端线相连接。随着线圈的增多，由多个线圈的电压组合起来，因为电刷一次可以和多个换向器片接触。各个导线环不在同一时间达到最大电压，所以脉动输出电压比前面所示只有一个线圈或线环时更加平滑，可以进一步利用滤波器平滑产生一个几乎恒定的直流输出（滤波器在第13章讨论）。

大多数发电机不使用永久磁铁，而是用电磁铁来提供所需的磁场，这样的一个优势是可以控制磁通密度，从而控制发电机的输出电压。电磁铁的绕组相应地称为励磁绕组，励磁绕组需要电流来产生磁场。

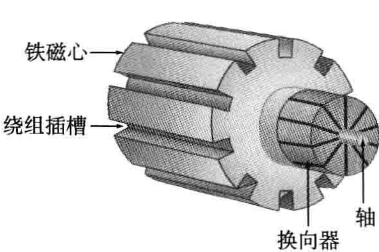


图7-41 简化的转子铁心，线圈压入插槽并接到换向器

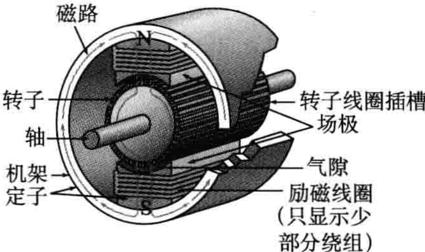


图7-42 发电机（或电动机）的磁结构，这种情况下转子也是电枢，因为它产生功率

励磁绕组电流可以由单独的电压源提供，但这是一个缺点。更好的方法是由发电机本身为电磁铁提供电流，这就是所谓*自激式发电机*。发电机开始工作时，由于存在磁滞通常场磁铁都有足够的剩磁，这可以产生一个小的初始磁场，使发电机能开始产生电压。在很长一段时间没有使用发电机的情况下，可能有必要提供一个外部电源来起动励磁绕组。

发电机（或电动机）的固定部分包括所有不移动的部分，称为*定子*。图7-42显示了简化的二极直流发电机，显示了磁路（端盖、轴承和换向器未显示）。注意，机架是场磁铁磁路的一部分。为了使发电机具有高效率，空气间隙应尽可能的小。*电枢*是电源组件，既可在转子中也可在定子中。前面所述的直流发电机，电枢就是转子，因为电源由运动导体产生并由转子通过换向器输出。

直流发电机的等效电路

自激式发电机可以用一个基本直流电路表示，由线圈产生磁场，机械驱动发电机，如图7-43所示。直流发电机还有其他的组态，这是最常见的一种。在所示的情况中，励磁绕组与电源并联，所以这种组态称为并励发电机。励磁绕组的电阻表示为R_F，等效电路中该电阻与励磁绕组串联。电枢受机械输入的驱动而旋转，电枢是发电机的电压源V_G，电枢电阻呈现为串联电阻R_A，变阻器R_{REG}与励磁绕组电阻串联，通过控制励磁绕组的电流和磁通密度调节输出电压。

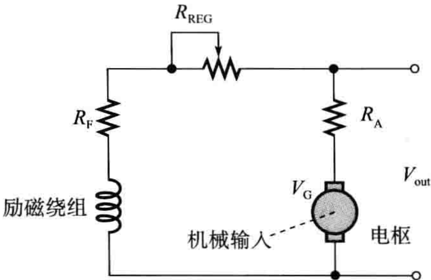


图7-43 自激并励直流发电机等效电路

在输出端接负载时，电枢中的电流由负载和励磁绕组共享。发电机的效率可用输送给负载的功率（P_L）与总功率（PT）的比来计算，其中包括电枢和励磁电路电阻的损失。

本节测试题

1. 发电机的运动部分的名称是什么？
2. 换向器有什么用途？
3. 较大的发电机励磁绕组电阻会对输出电压产生什么影响？
4. 自激式发电机的含义是什么？

7.7 直流电动机

利用磁场中载流导体产生的力，电动机将电能转换为机械运动。直流电动机由直流电源供电，既可使用电磁铁也可利用永久磁铁提供磁场。

学习完本节内容，应该能够

- 解释直流电动机的工作原理；
- 画出串励和并励直流电动机的等效电路；
- 讨论反电动势以及如何降低电枢电流；
- 讨论电动机的额定功率。

7.7.1 基本工作原理

和发电机的情况一样，电动机的动作也是磁场相互作用的结果。直流电动机中，转子磁场与定子绕组中电流建立的磁场相互作用，所有直流电动机的转子都包括用于建立磁场的电枢绕组，靠相反磁极间的吸引力和相同磁极间的排斥力使转子移动，如图7-44的简化框图所示。转子北极与定子南极的吸引力迫使转子运动（反之亦然），当两个磁极靠近时，换向器突然切换转子电流的极性，反转转子磁极。换向器作为一个机械开关，在异性磁极彼此接

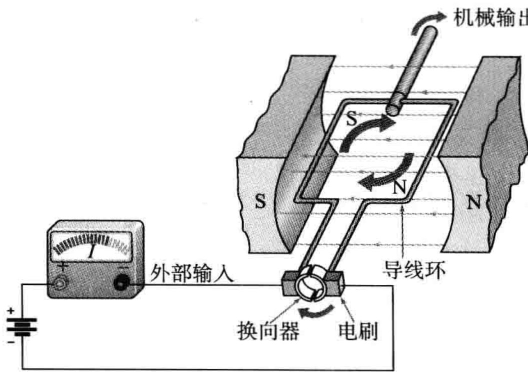


图7-44 简化的直流电动机

近时反转电枢中的电流方向，使转子继续旋转。

系统注释 电动机维护

工业系统通常有许多电动机执行诸如泵、机械操作、输送机和机械手控制等功能。运行的电动机太热可能表明有润滑油或轴承方面的问题需要解决。热图像可以发现这样的问题，所以很多公司将热成像作为例行检查和保养计划的一部分。



图片源自福禄克公司

7.7.2 无刷直流电动机

许多直流电动机不使用换向器反转电流的极性，不是给运动的电枢提供电流，而是利用电子控制器在定子绕组中产生旋转磁场。控制器由直流输入生成交流波形（或修改为交流波形），使励磁线圈电流的方向周期性反转，这将导致定子磁场旋转，永久磁铁转子与旋转磁场保持相同方向转动。感测旋转磁铁位置的常见方法是使用霍尔效应传感器，磁铁每次经过它时发送位置信息脉冲给控制器。无刷电动机比传统的有刷电动机具有更高的可靠性，因为它不需要定期更换电刷，但是，增加了电子控制器的复杂性。图 7-45 显示了无刷直流电动机的剖视图，包括电动机壳体内的脉冲宽度调制控制，以及指示转轴位置的光学编码器。

7.7.3 反电动势

第一次起动直流电动机时，励磁绕组产生磁场，电枢电流生成另一个磁场，与励磁绕组的磁场相互作用，起动电动机转动。电枢绕组在磁场中旋转，产生发电机作用。实际上，根据楞次定律，旋转电枢两端产生与原始施加电压相反的电压，这种自我产生的电压称为反电动势。术语“电动势”曾经常用来表示电压，但现在已不常见，因为电压不是物理意义上的“力”，但反电动势仍适用于电动机自我产生的电压。反电动势也称为对抗电动势。当电动机以恒定速度转动时，反电动势明显减小电枢电流。

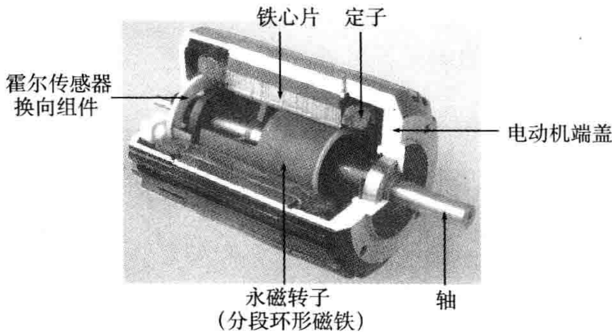


图 7-45 无刷直流电动机剖视图（宝鼎电气公司供图）

小贴士 直流电动机的一个特性是，如果在不带负载的情况下运行，转矩可能导致电动机“开飞车”超出制造商的额定转速。因此，直流电动机必须带负载工作，以防止自毁。

7.7.4 电动机额定参数

有些电动机用其可以提供的转矩来做额定参数，有些电动机用其可产生的功率做额定参数，转矩和功率是电动机的重要参数。虽然转矩和功率是不同的物理参数，但是如果已知其中一个，另一个也就可以得到。

转矩往往会旋转一个对象。在直流电动机中，转矩与磁通量和电枢电流成正比。直流电动机的转矩 T 可由下面公式计算：

$$T = k\Phi I_A \tag{7-9}$$

式中，T 是转矩，单位为牛顿·米（N·m）；k 为由电动机物理参数决定的常数；Φ 为磁通，单位为韦伯（Wb）；I_A 是电枢电流，单位为安培（A）。

回想一下，功率定义为做功的速率，要从转矩计算功率，必须知道该电动机的速度，单位是 r/m⊖。在一定速度下对于给定的转矩，功率的公式是

$$P = 0.105Ts \tag{7-10}$$

式中，P 是功率，单位为瓦特（W）；T 是转矩，单位为牛顿·米（N·m）；s 是电动机转速，单位为转/分钟（r/m）。

【例 7-9】 转矩为 3.6N·m 时电动机以 350r/m 的转速转动，试问电动机的输出功率是多少？

解： 把数值代入公式（7-10）

$$P = 0.105Ts = 0.105 \times 3.6\text{N}\cdot\text{m} \times 350\text{r/m} = 132\text{W}$$

相关问题：已知一马力功率为 746W，试问这个电动机在上面条件下的马力是多少？

系统举例 7-2　直流电动机反转

直流电动机应用在很多系统中，从小型便携式钻机到大型起重机。许多使用直流电动机的系统中，需要电动机能够反转，例如，带动车库门的电动机在打开或关闭门时就需要反转。要使直流电动机反转，需要能给磁场（定子）和电枢（转子）单独连接电源，切换转子或定子的极性。只能有一个绕组极性反转，如果两个都被反转，电动机将以相同方向转动。

在某些情况下，可以通过逻辑操作控制正或反方向，这里描述的系统用继电器作为逻辑接口，继电器触点指示电动机反转开关的方向，图 7-46 显示了一个简化的反转电路。除了能反转电动机，继电器还有第二个好处，它把电动机电路和低电压逻辑电路完全隔离开。

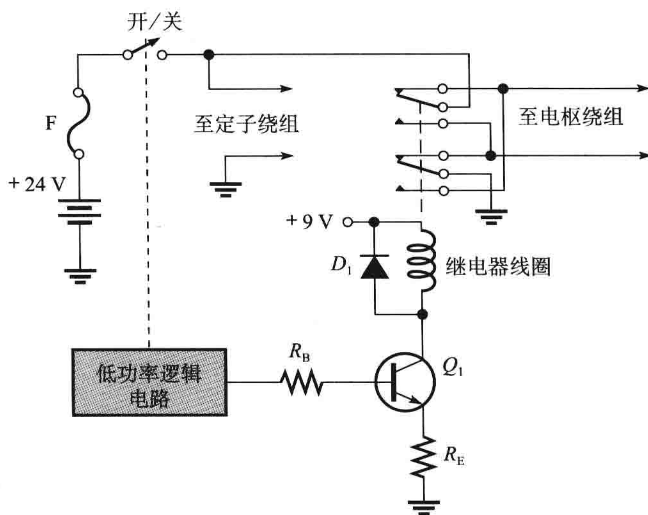


图 7-46　使用继电器的直流电动机反转电路

晶体管（Q_1）作为一个开关构成连接继电器线圈的逻辑接口。当逻辑为低电平时，晶体管截止，继电器处于未通电位置，当逻辑为高电平时，晶体管导通，激活继电器。逻辑电路由继电器和电动机电源隔离。二极管用来防止继电器断电时噪声尖峰。由逻辑控制“开/关”在电动机改变转向之前切断电动机电源。

7.7.5　串励直流电动机

串励直流电动机的励磁线圈绕组和电枢线圈绕组串联，图 7-47a 给出了这种结构的示意图。其内部电阻通常比较小，由励磁线圈电阻、电枢绕组电阻和电刷电阻组成。直流电动机作为发电机的情况下，也可以包含一个极间的绕组，如图 7-47a 所示，用于控制速度和限制电流。串励直流电动机的电枢电流、励磁电流和线电流相同。

我们知道，磁通与线圈的电流成正比，由于串联连接，励磁绕组产生的磁通与电枢电流成正比，当电动机加载时，电枢电流增大，磁通上升。回顾式（7-9），直流电动机的转矩与电枢电流和磁通成正比。因为磁通和电枢电流高，所以当电流比较大时，串励电动机具有非常高的起动转矩。

⊖ r/m 即 revolutions per minute，转/分钟，简记为 rpm。——译者注

因为这个原因，串励直流电动机被用于需要高起动转矩的场合（如汽车的起动电动机）。

串励直流电动机的转矩与转速特性如图 7-47b 所示，起动转矩为最大值，低转速时的转矩仍然非常高，但是随着转速增大却急剧下降。可以看出，如果转矩低，速度可能非常高，因为这个原因，串励直流电动机总是带负载工作。

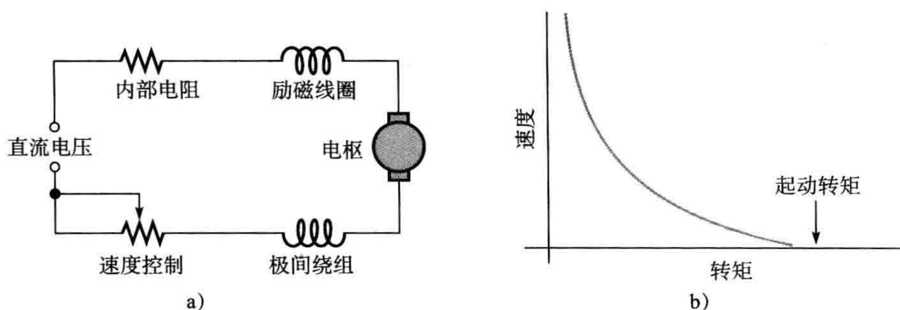


图 7-47 串励直流电动机简化原理图及转矩-转速特性

7.7.6 并励直流电动机

并励直流电动机的励磁线圈与电枢并联，等效电路如图 7-48a 所示。并励直流电动机中，恒定电压源给励磁线圈供电，因此励磁线圈建立的磁场是恒定的。电枢电流则取决于电枢电阻和发电机作用产生的反电动势。

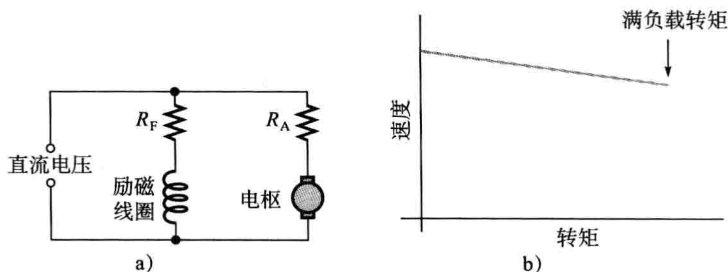


图 7-48 并励直流电动机简化原理图及转矩-转速特性

并励直流电动机的转矩-转速特性与串励直流电动机完全不同。施加载荷时，并联电动机将减慢转速，引起反电动势减小、电枢电流增大。电枢电流的增大试图增大电动机的转矩以补偿施加的负载。虽然增加负载使电动机转速放缓，并励直流电动机的转矩-转速特性仍近似为一条直线，如图 7-48b 所示。满负荷时，并励直流电动机仍然具有较高的转矩。

本节测试题

1. 试问什么产生反电动势？
2. 试问旋转电枢加快速度时反电动势怎样影响电流？
3. 试问哪种直流电动机具有最高的起动转矩？
4. 与有刷电动机相比，无刷电动机的主要优点是什么？

本章小结

- 与异性磁极相互吸引不同，同性磁极相互排斥。
- 能够被磁化的材料称为铁磁材料。

- 当导体中有电流通过时，在该导体周围产生磁场。
- 可应用左手定则确定导体周围电磁场的磁力线方向。
- 电磁铁基本上就是绕在铁心上的线圈。
- 当导体在磁场内运动或磁场相对于导体运动时，在导体两端将感应出电压。
- 导体与磁场之间的相对运动越快，感应电压越大。
- 表7-3总结了本章中的物理量及SI单位。
- 霍尔效应传感器用电流感测磁场的存在。
- 直流发电机将机械功率转换为直流电功率。
- 发电机或电动机的运动部分称为转子，固定部分称为定子。
- 直流电动机将电功率转换为机械功率。
- 无刷直流电动机使用永久磁铁作为转子，定子为电枢。

表7-3 本章中的物理量及SI单位

符号	物理量	SI单位	符号	物理量	SI单位
B	磁通密度	特斯拉（T）	Φ	磁通	韦伯（Wb）
μ	磁导率	韦伯/安·米（Wb/A·m）	R_m	磁阻	安/韦伯（A/Wb）
F_m	磁动势（mmf）	安（A）	H	磁场强度	安/米（A/m）
F	磁力	牛顿（N）	T	转矩	牛顿·米（N·m）

关键术语

安(Anpere，A) 磁动势（mmf）的SI单位。

电磁场（Electromagnetic field） 导体中电流在导体周围所产生的一组磁力线的形式。

电磁感应（Electromagnetic induction） 导体与磁场或电磁场之间存在相对运动时，在导体中产生电压的现象或过程。

电磁现象（Electromagnetism） 导体中电流产生磁场。

法拉第定律（Faraday's law） 一个表述线圈两端感应电压等于线圈匝数乘以磁通变化率的定律。

高斯（Gauss） 磁通密度的CGS单位。

霍尔效应（Hall effect） 当导体或半导体中电流垂直于磁场时电流密度发生变化，电流密度的变化产生一个小的横向电压称为霍尔电压。

磁滞（Hysteresis） 磁性材料的一种特性，材料磁化的变化滞后于所施加的磁场强度。

感应电流（Induced current，i_{ind}） 变化的磁场在导体中感应出的电流。

感应电压（Induced voltage，v_{ind}） 变化的磁场产生的电压。

楞次定律（Lenz's law） 一个物理定律，说明当通过线圈的电流变化时，由变化的磁场产生的感应电压的极性总是阻碍电流的变化，电流不能瞬间改变。

磁力线（Lines of force） 磁场中从北极指向南极的力线。

磁场（Magnetic field） 从磁铁的北极指向南极的力场。

磁通（Magnetic flux） 永久磁铁或电磁铁南北两极之间的磁力线数。

磁通密度（Magnetic fluxintensity） 磁性材料单位长度的磁动势。

磁动势（Magnetic force，mmf） 磁场的源，以安培-匝度量。

磁导率（Permeability） 材料中建立磁场难易程度的度量。

继电器（Relay） 一种电触头由磁化电流断开或闭合的电磁控制机械装置。

磁阻（Reluctanc，$\mathfrak{R}$） 材料对磁场建立的阻止能力。

保磁性（Retentivity） 一旦磁化，撤除磁化力后材料保持磁化状态的能力。

电磁线圈（Solenoid） 一种由磁化电流激活轴或柱塞的机械运动的电磁控制装置。

扬声器（Speaker） 一种将电信号转换为声波的电磁器件。

特斯拉（Tesla，T） 磁通密度的SI单位。

韦伯（Weber，Wb） 磁通的SI单位，表示10^8条磁力线。

关键公式

(7-1) $B = \frac{\Phi}{A}$ 磁通密度

(7-2) $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ 相对磁导率

(7-3) $\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$ 磁阻

(7-4) $F_m = NI$ 磁动势

(7-5) $\Phi = \frac{F_m}{R_m}$ 磁通

(7-6) $H = \frac{F_m}{l}$ 磁场强度

(7-7) $v_{ind} = B_{\perp} l v$ 感应电压

(7-8) $F = BIl$ 载流导体的受力

(7-9) $T = k\Phi I_A$ 直流电动机的转矩

(7-10) $P = 0.105Ts$ 由转矩求功率

是非测验题

1. 特斯拉（T）和高斯（G）都是磁通密度的单位。
2. 测量磁动势（mmf）的单位是伏特。
3. 磁路的欧姆定律给出了磁通密度、磁动势和磁阻的关系。
4. 电磁线圈是一种电磁开关，由它断开或闭合机械触点。
5. 磁滞曲线是磁通密度（B）对于磁场强度（H）的函数图。
6. 为了在线圈中产生感应电压，要求周围的磁场能够变化。
7. 可以用励磁绕组中的变阻器控制发电机的速度。
8. 自激式直流发电机在首次运转时，在磁路磁铁中通常都具有足够的剩磁用于起动发电机，产生输出电压。
9. 电动机的功率与它的转矩成正比。
10. 在无刷电动机中，由永久磁铁提供磁场。

自测题

1. 两个条形磁铁的南极靠近时，会有
   (a) 吸引力
   (b) 排斥力
   (c) 向上的力
   (d) 没有力
2. 磁场的构成部分是
   (a) 正、负电荷
   (b) 磁畴
   (c) 磁通线
   (d) 磁极
3. 磁场的方向是从
   (a) 北极指向南极
   (b) 南极指向北极
   (c) 磁铁内指向磁铁外
   (d) 从前指向后
4. 磁路中的磁阻类似于
   (a) 电路中的电压
   (b) 电路中的电流
   (c) 电路中的功率
   (d) 电路中的电阻
5. 磁通的单位是
   (a) 特斯拉
   (b) 韦伯
   (c) 高斯
   (d) 安
6. 磁动势的单位是
   (a) 特斯拉
   (b) 韦伯
   (c) 安
   (d) 电子伏特
7. 磁通密度的单位是
   (a) 特斯拉
   (b) 韦伯
   (c) 安
   (d) 安/米
8. 以可动轴的电磁激活为基础的是
   (a) 继电器
   (b) 断路器
   (c) 电磁开关
   (d) 电磁线圈

9. 当有电流流过磁场中的导线时
   (a) 导线将过热
   (b) 导线将被磁化
   (c) 有一个力施加在电线上
   (d) 磁场将消失
10. 线圈置于变化的磁场中，若线圈匝数增多，则线圈两端的感应电压
   (a) 保持不变
   (b) 减小
   (c) 增大
   (d) 过大
11. 如果导体以恒定速度在恒定磁场中来回移动，则导体中感应的电压将
   (a) 保持恒定
   (b) 反转极性
   (c) 减小
   (d) 增大
12. 在图7-35所示的曲轴位置传感器中，引起线圈感应电压的是
   (a) 线圈中的电流
   (b) 磁盘的转动
   (c) 通过磁场的标签
   (d) 磁盘转动的加速度
13. 发电机或电动机中换向器的用途是
   (a) 随着转子的旋转改变流入转子电流的方向
   (b) 改变流入定子绕组电流的方向
   (c) 支撑电动机或发电机轴
   (d) 为电动机或发电机提供磁场
14. 电动机中反磁动势用做
   (a) 增大电动机的功率
   (b) 减小磁通
   (c) 增大励磁绕组电流
   (d) 减小电枢电流
15. 电动机的转矩正比于
   (a) 磁通量
   (b) 电枢电流
   (c) 上面两项
   (d) 上面都不是

习题

基本习题

7.1节

1. 如果磁场的磁通不变而增大横截面面积，试问磁通密度是增大还是减小？
2. 某磁场横截面积为 $0.5\mathrm{m}^2$，磁通为 $1500\mu\mathrm{Wb}$，试问磁通密度是多少？
3. 若磁通密度为 $2500\times10^{-6}\ \mathrm{T}$，横截面积为 $150\mathrm{cm}^2$，试问磁性材料的磁通是多少？
4. 在给定位置，地磁场为0.6G（高斯），请用特斯拉表示磁通密度。
5. 某非常强的磁铁具有 $100\ 000\mu\mathrm{T}$ 磁场，请用高斯表示磁通密度。

7.2节

6. 当通过导体的电流反向，试问图7-11所示的指南针会怎样？
7. 如果材料的绝对磁导率为 $750\times10^{-6}\ \mathrm{Wb/A\cdot m}$，试问材料的相对磁导率是多少？
8. 材料的长度为0.28m，截面积为 $0.08\mathrm{m}^2$，如果绝对磁导率为 $150\times10^{-7}\ \mathrm{Wb/A\cdot m}$，试确定该材料的磁阻。
9. 3A电流流过500匝的线圈，试问磁动势是多少？

7.3节

10. 通常情况下，试问激活的电磁线圈柱塞是伸出还是缩回？
11. (a) 电磁线圈激活时，什么力推动柱塞移动？
    (b) 什么力使柱塞返回到其静止位置？
12. 在图7-49所示的电路中，解释开关1（SW1）闭合开始的事件顺序。

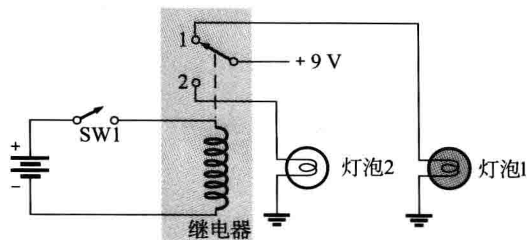


图 7-49

13. 当有电流通过线圈时，是什么原因导致达松发尔电表机心中的指针偏转？

7.4节

14. 习题9中如果磁心的长度为0.2m，试问磁化力是多少？
15. 在图7-50中，不改变磁心的物理特性，试问

怎样能改变磁通密度？

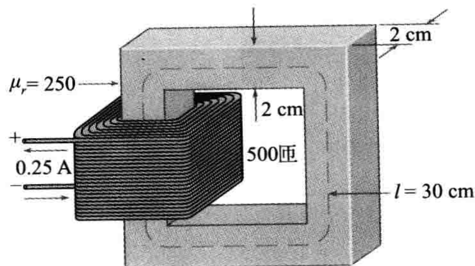


图 7-50

16. 在图 7-50 中，如果绕组有 100 匝，试确定
    (a) H (b) Φ (c) B
17. 试确定图 7-51 所示的磁滞曲线中哪种材料的保磁性最好。

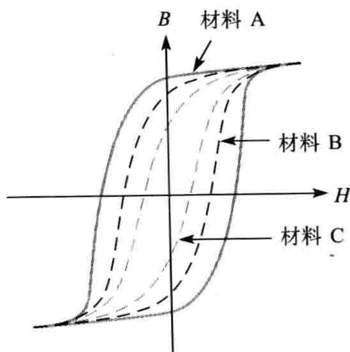


图 7-51

7.5 节

18. 根据法拉第定律，如果磁通量变化的速率加倍，试问给定线圈两端感应电压将怎样变化？
19. 给定线圈两端感应电压为 100mV，将 100Ω 电阻接在线圈两端，试问感应电流为多大？
20. 在图 7-35 中，当钢盘不旋转时为什么没有感应电压？
21. 一段 20cm 长的导体在磁铁的两极之间向上运动，如图 7-52 所示，磁极端面边长8.5cm，磁通为1.24Wb，运动在导体两端产生了 44mV 感应电压，试问导体的运动速度是多大？
22. (a) 对于图 7-52 所示的导体，字母 A 标记端的极性是什么？

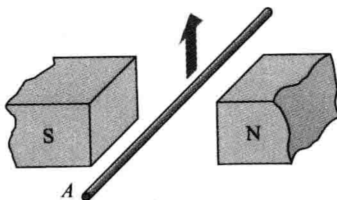


图 7-52

(b) 假设有完整的路径，电流以你标记的方向流动，试问导体上感应电动势的方向是什么？

7.6 节

23. 如果发电机效率为 80%，提供给负载 45W 功率，试问输入功率为多少？
24. 假设图 7-43 所示的自激并励直流发电机向连接的负载提供 12A 电流，如果励磁绕组吸收 1.0A 电流，试问电枢电流为多大？
25. (a) 如果习题 24 中输出电压为 14V，试问提供给负载的功率是多大？
    (b) 消耗在励磁电阻上的功率是多大？

7.7 节

26. (a) 电动机转速为 1200r/m，转矩为 3.0N-m，试问输出功率是多大？
    (b) 试问该电动机的额定马力是多大（746W＝1hp)？
27. 假设电动机提供给负载 50W 功率时内部消耗 12W 功率，试问其效率是多少？

高级习题

28. 基本单环直流发电机以 60r/s 旋转，试问每秒钟有多少次直流输出电压峰值（达到最大值）？
29. 假设另一个环与第一个环成 90°，加入到习题 28 的直流发电机中，试描述输出电压，设最大电压值为 10V。
30. 试解释图 7-22 中继电器的三组触点（A、B、C）各自的用途。
31. 对于图 7-46 的直流电动机反转电路，假设电枢极性与定子极性相反，试问继电器线圈带电了吗？解释之。

Mutisim 仿真故障排除习题

32. 打开文件 P07-32，确定电路中是否有故障，如果有，试识别之。
33. 打开文件 P07-33，确定电路中是否有故障，如果有，试识别之。

各节测试题答案

7.1 节

1. 北极相斥。
2. 磁通是指构成磁场的磁力线组，而磁通密度则是指单位面积的磁通。
3. 高斯和特斯拉。
4. $B=\Phi/A=900\mu T$。

7.2 节

1. 电磁是由导体中电流产生的，仅在有电流时存在电磁场，而磁场则与电流无关。
2. 当电流的方向反转时，磁场方向也反转。
3. 磁通等于磁动势除以磁阻。
4. 磁通对应电流，磁动势对应电压，磁阻对应电阻。

7.3 节

1. 电磁线圈提供轴的机械运动，继电器提供电气触点的闭合。
2. 电磁线圈的活动部分是柱塞。
3. 继电器的活动部分是电枢。
4. 达松发尔电表机心基于磁场的相互作用。

7.4 节

1. 电流的增大会增加绕线磁心中的磁通密度。
2. 保磁性是磁场强度撤除后材料保持磁化状态的能力。

7.5 节

1. 感应电压为零。
2. 感应电压增大。
3. 在磁场中载流导体受到力的作用。
4. 感应电压为零。

7.6 节

1. 转子。
2. 换向器反转旋转线圈中电流的方向。
3. 大磁阻减小磁通，导致输出电压降低。
4. 发电机励磁绕组电流源自自身的发电输出。

7.7 节

1. 电动机转子转动时，因其发电机作用而形成的电压称为反电动势。其极性与原电源电压极性相反。
2. 反电动势减小电枢电流。
3. 串励电动机。
4. 因为没有电刷磨损，所以可靠性更高。

例题中相关问题答案

例 7-1　19.6×10^{-3} T

例 7-2　31.0T

例 7-3　磁阻减小到 12.8×10^{6} A/Wb

例 7-4　磁阻为 165.7×10^{3} A/Wb

例 7-5　7.2mWb

例 7-6　$F_m=42.5$A；$R_m=8.5\times10^{4}$ A/Wb

例 7-7　40mV

例 7-8　方向沿负 X 轴

例 7-9　0.18hp

自测题答案

1. (b)　2. (c)　3. (a) 4. (d)　5. (b)　6. (c)　7. (a)　8. (d)　9. (c)　10. (c)　11. (b)　12. (c)　13. (a)　14. (d)　15. (c)

是非测验题答案

1. T　2. F　3. F　4. F　5. T　6. T　7. F　8. T　9. T　10. F

第8章 交流电流与电压简介

本章目标

- 识别正弦波形并测量其特征
- 确定正弦波的电压与电流值
- 描述正弦波的角度关系
- 用数学方法分析正弦波形
- 将基本电路定律应用到交流电阻电路
- 说明交流发电机的发电原理
- 解释交流电动机如何将电能转换成旋转运动
- 识别基本非正弦波形的特征
- 用示波器测量波形
- 描述信号源种类并解释典型控制的用途

本章介绍交流电电路。交流电压和电流随时间波动并按一定模式周期性地改变极性和方向，称为波形。由于正弦波形（正弦波）是交流电路中最基本和最重要的波形，因此需要特别重视。

本章介绍了发电机（产生正弦波）和交流电动机，还介绍了其他类型的波形，包括脉冲、三角形和锯齿波。本章同时讨论了显示与测量波形的示波器的使用。测试系统常常需要一些特定的波形。本章最后讨论信号的产生。

8.1 正弦波形

正弦波形或*正弦波*（sine wave）是交流电流和交流电压的基本类型，电力公司提供的电力服务就是正弦电压和电流。此外，其他类型的重复性*波形*（waveform）是由许多单个正弦波合成的，这些单个正弦波称为谐波。

学习完本节内容，应该能够

- 识别正弦波并测量其特征参数；
- 定义并确定周期；
- 定义并确定频率；
- 弄清周期与频率的关系；
- 描述两种电信号发生器。

正弦波产生的方式有两种：交流发电机或电子振荡器电路，振荡器电路通常用于电子信号发生器。本节将简单介绍电子信号发生器，详细内容将在8.10节讨论。利用机电方法产生交流电的发电机将在8.6节讨论。图8-1显示了正弦电压源的符号。



图8-1　正弦电压源符号

图8-2显示了一般的正弦波波形，它可以是交流电流或交流电压。纵轴表示电压（或电流），横轴表示时间（t）。注意电压（或电流）随时间如何变化。电压（或电流）从零开始增大到正最大值（峰值）后返回零，然后向负方向变化，增大到负最大值（峰值）后再次返回零，这样完成一个完整的周期。

8.1.1 正弦波的极性

如前所述，正弦波在零值时改变极性，也就是说，正弦波在正值和负值之间交替变化。将

正弦电压源（V_S）施加到电阻电路时，产生交变的正弦电流，如图 8-3 所示。电压改变极性时，电流也相应地改变方向。

在电源电压 V_S 正交变期间，电流的方向如图 8-3a 所示。在电源电压的负交变期间，电流的方向相反，如图8-3b 所示。将正交变和负交变期间合并组成正弦波的一个周期。

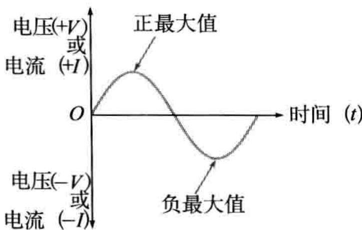
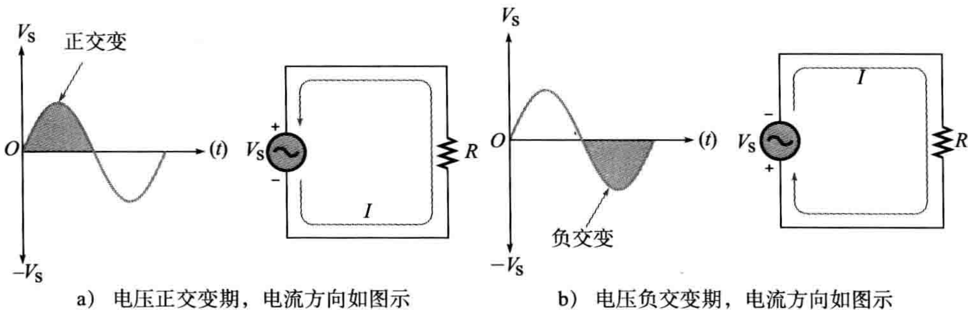


图 8-2　正弦波一个周期的图形



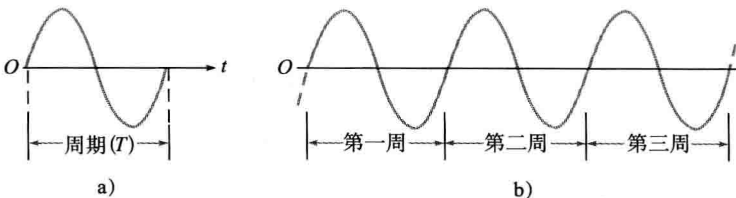
a）电压正交变期，电流方向如图示　　b）电压负交变期，电流方向如图示

图 8-3　交变电流和电压

8.1.2　正弦波的周期

正弦波随时间（t）以可定义的方式变化。对于给定的正弦波，完成完整一周变化所需的时间称为周期（T）。

图 8-4a 显示了正弦波的周期。通常情况下，正弦波随时间周期性地重复，如图 8-4b 所示。由于每周重复的正弦波都是相同的，因此对于一个给定的正弦波，周期是一个固定值。正弦波的周期可通过测量两个相应的过零点之间的时间间隔得到，如图 8-4a 所示。也可通过测量两个相邻峰值之间的时间间隔得到周期。



a）　　b）

图 8-4　给定正弦波每周的周期都是相同的

【例 8-1】　试问图 8-5 所示正弦波的周期是多少？

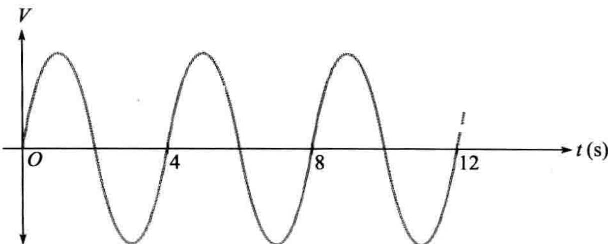


图　8-5

解： 如图 8-5 所示，完成三周的时间间隔为 12s，因此，完成一周所需的时间是 4s，即周期 $T=4\ \text{s}$

相关问题：如果给定正弦波 12s 变化五周，试问周期是多少？

【例 8-2】 说明三种测量图 8-6 所示正弦波周期的方法，试问显示了多少周？

解： 方法一：测量两个相邻过零点之间的时间间隔（对应过零点的斜率必须相同）。

方法二：测量两个正峰值之间的时间间隔。

方法三：测量两个负峰值之间的时间间隔。

这些测量如图 8-7 所示，其中显示了两个周期的正弦波。记住，无论是采用过零点还是采用峰值测量得到的正弦波的周期值相同。

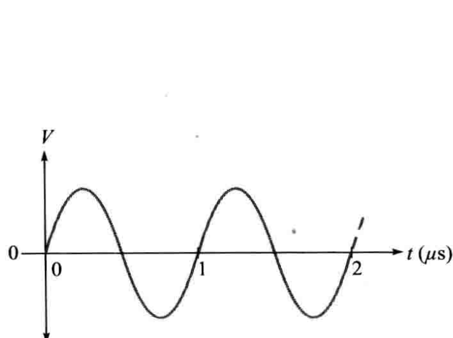


图 8-6

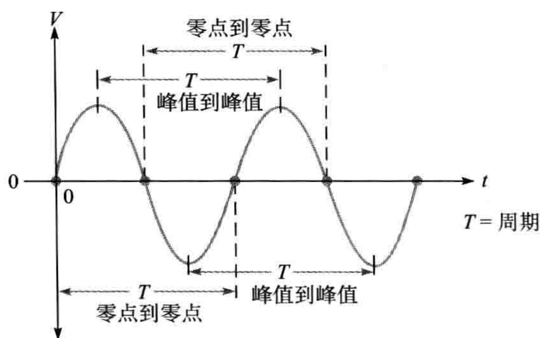


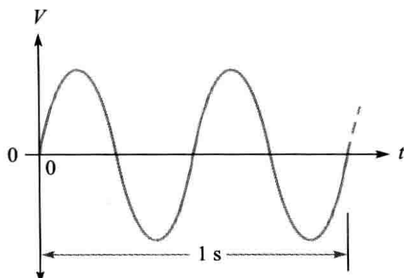
图 8-7 正弦波周期的测量

相关问题：如果一个正峰值出现在 1ms 处，下一个正峰值出现在 2.5ms 处，试问周期是多少？

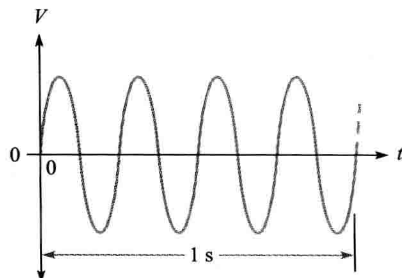
8.1.3 正弦波的频率

频率是一秒钟内正弦波完成的变化周数。

一秒钟内完成的周数越多，频率越高。频率（f）的测量单位是**赫兹**（Hz），一赫兹等价于一秒钟变化一周，例如，60Hz 就是每秒钟 60 周。图 8-8 显示了两个正弦波，图 8-8a 所示的正弦波一秒钟变化两周，而图 8-8b 所示的正弦波一秒钟变化四周，因此，图 8-8b 所示的正弦波的频率是图 8-8a 所示的正弦波的频率的两倍。



a) 低频：每秒周数较少



b) 高频：每秒周数较多

图 8-8 频率演示

8.1.4 频率和周期的关系

频率和周期的关系公式是

$$f = \frac{1}{T} \tag{8-1}$$

$$T = \frac{1}{f} \tag{8-2}$$

T 和 f 互为倒数，知道其中一个，在计算器上利用 x^{-1} 或 $1/x$ 键即可计算另一个（某些计算器上倒数键是第二功能）。这种反比关系表明，在一秒内长周期正弦波比短周期正弦波经过的周数要少。

【例 8-3】 试问图 8-9 中哪个正弦波具有较高的频率？试确定两个波形的频率和周期。

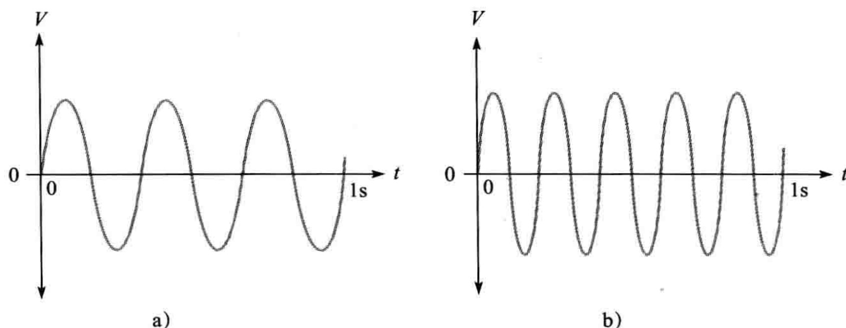


图 8-9

解： 图 8-9b 所示的正弦波具有较高的频率，因为在一秒钟内它比图 8-9 所示的 a 正弦波完成的周数要多。

在图 8-9a 中，1s 完成三周，因此

$$f = 3\text{Hz}$$

一周用时 0.333s（1/3 秒），所以周期为

$$T = 0.333\text{s} = 333\text{ms}$$

在图 8-9b 中，1s 完成五周，因此

$$f = 5\text{Hz}$$

一周用时 0.2s（1/5 秒），所以周期为

$$T = 0.2\text{s} = 200\text{ms}$$

相关问题：如果给定正弦波两个相邻负峰值的时间间隔是 50μs，试问频率是多少？

【例 8-4】 某正弦波的周期为 10ms，试问频率是多少？

解： 利用式（8-1）

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10\text{ms}} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}\text{s}} = 100\text{Hz}$$

相关问题：某正弦波 20ms 完成四周变化，试问频率是多少？

【例 8-5】 正弦波的频率为 60Hz，试问其周期是多少？

解： 利用式（8-2）

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60\text{Hz}} = 16.7\text{ms}$$

相关问题：如果 $f = 1\text{kHz}$，试问 T 是多少？

8.1.5 电子信号发生器

信号发生器是测试或控制电子电路和系统中以电子方式产生正弦波的仪器。信号发生器的种类繁多，有在限定频率范围只产生一种波形的特殊用途的信号发生器，也有可编程仪器的宽

频率范围产生多种波形信号发生器。所有信号发生器基本上都由振荡器构成，振荡器是一种仅有直流电源电压输入而在输出端产生周期性波形的电子电路。

电子信号发生器在各类系统测试中很重要。一类信号发生器称为函数发生器，可以产生多种输出波形，如正弦波、三角波和方波。另一类信号发生器称为任意波形发生器，可以生成复杂的信号，用于模拟不同类型的输入。例如，地震安全结构测试实验室可能需要模拟复杂的地震信号，如图 8-10 所示的任意波形发生器可以很容易地模拟这种信号。8.10 节将详细介绍这类信号发生器及其他类型的电子信号发生器。



图 8-10　典型任意波形发生器
图片经 Copyright © Tektronix 公司的许可转载

本节测试题

1. 试描述正弦波的一个周期。
2. 试问正弦波在什么点改变极性？
3. 试问在一个周期内正弦波有多少个最大值点？
4. 试问如何测量正弦波的周期？
5. 请给出频率的定义，并说明其单位。
6. 已知 $T = 5\mu s$，求 f。
7. 已知 $f = 120Hz$，求 T。

8.2　正弦波电压与电流的值

表示和测量正弦波电压或电流大小的方式有五种，分别是瞬时值、峰值、峰峰值、有效值和平均值。

学习完本节内容，应该能够

- 确定正弦波电压和电流的值；
- 求任意点的瞬时值；
- 求峰值；
- 求峰峰值；
- 定义并求解有效值；
- 解释为什么一个周期内交变正弦波的平均值总是零；
- 求半周期平均值。

8.2.1　瞬时值

图 8-11 显示了正弦波电压（或电流）在任意时间点有瞬时值。沿曲线不同点的瞬时值不同，在正交变期间瞬时值均为正值，而在负交变期间瞬时值均为负值。电压和电流的瞬时值符号分别用小写字母 v 和 i 表示。图 8-11a 的曲线虽然仅显示出电压，但同样适用于电流，只需将 v 用 i 替换。图 8-11b 显示了一个瞬时值的例子，其中 $1\mu s$ 时的瞬时电压为 3.1V、$2.5\mu s$ 时为 7.07V、$5\mu s$ 时为 10V、$10\mu s$ 时为 0 V、$11\mu s$ 时为 −3.1V 等。

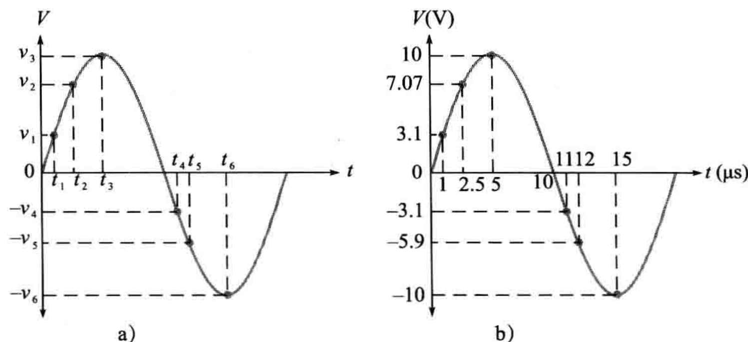


图 8-11　正弦电压的瞬时值举例

8.2.2 峰值

正弦波的峰值是在相对于零的正或负最大（峰值）电压（或电流）值。因为正、负峰值幅度相等，所以只用一个峰值来描述正弦波的特征，如图 8-12 所示。对于给定的正弦波，其峰值是恒定的，用 V_p或 I_p表示。正弦波的最大值或峰值也称为*振幅*，从 0 V 线到峰值线测量得到振幅。图 8-12 中峰值电压为 8V，这也是它的振幅。

8.2.3 峰峰值

正弦波的*峰峰值*是从正峰值到负峰值的电压（或电流），如图 8-13 所示。峰峰值用符号 V_{pp}或 I_{pp}表示，其值总是峰值的两倍，可由下面的公式表示：

$$V_{pp} = 2V_p \tag{8-3}$$

$$I_{pp} = 2I_p \tag{8-4}$$

在图 8-13 中，峰峰值为 16V。

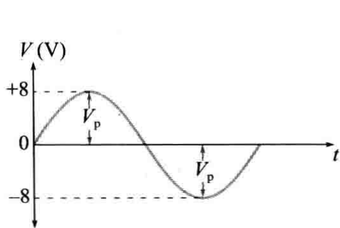


图 8-12 峰值电压

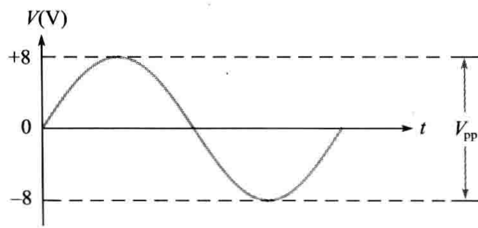


图 8-13 峰峰值电压

8.2.4 有效值

术语 rms 代表方均根，大多数交流电压表都显示有效值电压，墙面电源插座的 120 V 就是 rms 值。*方均根值*也称为正弦电压的*有效值*，是正弦波热效应的实际测量。例如，当电阻器如图 8-14a 所示跨接在交流（正弦）电压源两端时，产生一定量的热量，相同的电阻器跨接在一个直流电压源两端，如图 8-14b 所示，可以调整交流电压，使电阻器放出与连接到直流电源时相同量的热量。

正弦电压的有效值等于在电阻中产生同样热量的直流电压值。

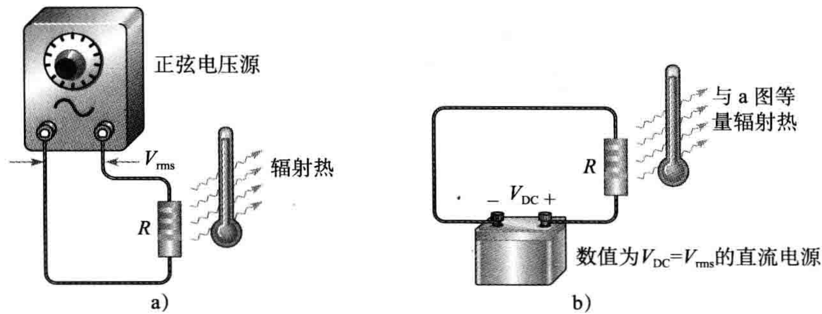


图 8-14 当两个装置的电阻器产生相同的热量时，正弦电压的有效值与直流电压相等

可用下列式子将正弦电压或电流的峰值转换成对应的有效值：

$$V_{rms} = 0.707V_p \tag{8-5}$$

$$I_{rms} = 0.707I_p \tag{8-6}$$

如果已知有效值，可以利用下面公式求峰值。

$$V_p = \frac{V_{rms}}{0.707}$$

$$V_p = 1.414V_{rms} \tag{8-7}$$

同样地

$$I_p = 1.414I_{rms} \tag{8-8}$$

可以简单地将峰值乘以2求峰峰值，也可以将有效值乘以2.828求得。

$$V_{pp} = 2.828V_{rms} \tag{8-9}$$

$$I_{pp} = 2.828I_{rms} \tag{8-10}$$

系统举例8-1　钳形表

大多数工业电气和电子系统都含有交流电动机和其他大电流负载用于风机、泵和输送机。要断开电路来检查电流，特别是在工作过程中，往往既不现实又很费时，而且存在安全隐患。传统钳形表是一种非接触电表，利用变压器作用（变压器将在第14章讨论）通过感应导线周围的磁场变化测量大电流。使用中用户选择量程和夹在导体周围的钳口或柔性电流探头，电表基于所选量程显示电流值。这是一种快速简便地检查电动机电流的方法，以便验证是否超载，或检查三相电动机是否相位平衡。

钳形表最初只是设计用于测量交流电流，今天它们也常具有传统DMM（数字万用表）的所有功能（测量电阻、电压、直流电流，有时还能测量频率）。能够测量直流电流的电表使用霍尔效应传感器。图8-15所示的电表是一个正用于测量汽车电池直流电流的多功能仪表。

有些钳形表具有最小/最大容量。最小/最大功能将显示出电流的范围。这在读取4～20 mA电流的回路电流时非常有用（参阅6.5.2节的系统注释），最小/最大容量在故障排除时也很有用，如确定间歇性跳闸断路器的最大电流。



图8-15　带有可拆卸钳口的多功能钳形表
图片经Fluke公司的许可转载

8.2.5　平均值

由于正值（过零点之上）与负值（过零点之下）互相抵消，因此，正弦波在一个完整周期的平均值总是为零。

出于比较以及确定电源整流后电压平均值的需要，正弦波的平均值定义为半周期平均而不是在一个完整周期的平均。用峰值电压和电流表示的正弦波平均值如下：

$$V_{avg} = 0.637V_p \tag{8-11}$$

$$I_{avg} = 0.637I_p \tag{8-12}$$

电压正弦波的半周期平均值如图8-16所示。

【例8-6】　试确定图8-17所示正弦波的V_p、V_{pp}、V_{rms}和半周期V_{avg}。

解： 直接由图可知V_p=4.5V，据此计算其他各个量。

$$V_{pp} = 2V_p = 2 \times 4.5\text{V} = 9\text{V}$$

$$V_{rms} = 0.707V_p = 0.707 \times 4.5\text{V} = 3.18\text{V}$$

$$V_{avg} = 0.637V_p = 0.637 \times 4.5\text{V} = 2.87\text{V}$$

相关问题：如果V_p=25V，试确定正弦波的V_{pp}、V_{rms}和V_{avg}。

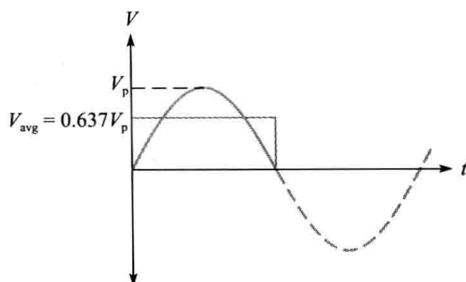


图 8-16　半周期平均值

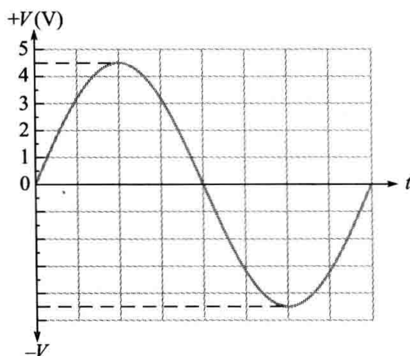


图　8-17

本节测试题

1. 对于下列情况计算 V_{pp}。
   (a) V_p=1V
   (b) V_{rms}=1.414V
   (c) V_{avg}=3V
2. 对于下列情况计算 V_{rms}。
   (a) V_p=2.5V
   (b) V_{pp}=10V
   (c) V_{avg}=1.5V
3. 对于下列情况计算 V_{avg}。
   (a) V_p=10V
   (b) V_{rms}=2.3V
   (c) V_{pp}=60V

8.3　正弦波的角度测量

我们看到，可以沿着水平时间轴测量正弦波，但是，由于完成一个完整周期或部分周期所需的时间都与频率有关，因此以度或弧度表示角度测量来表示正弦波的指定点往往更有用。角度测量与频率无关。

学习完本节内容，应该能够

- 描述正弦波的角度关系；
- 说明如何以角度测量正弦波；
- 给出弧度的定义；
- 将弧度转换为度；
- 确定正弦波的相位。

正弦电压可以由交流发电机产生，交流发电机的转子旋转和正弦波的输出存在直接的关系，因此，转子位置的角度测量与输出正弦波的角度直接相关。

8.3.1　角度测量

度是角度的度量，对应于一个圆周的1/360。弧度是与半径等长的圆周所张的角度，一弧度相当于57.3°，如图8-18所示。旋转360°等于2π弧度。

希腊字母π (pi) 表示任意圆周的周长与其直径之比，是一个常量，近似为3.1416。

在科学计算器上都有π键，因此实际数值是不需要键入的。

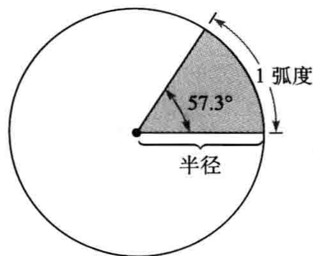


图 8-18　表明弧度与度关系的角度测量

表8-1列出了若干度与弧度的对应值，这些角度

的测量如图 8-19 所示。

表 8-1

度/°	弧度/rad
0	0
45	$\pi/4$
90	$\pi/2$
135	$3\pi/4$
180	π
225	$5\pi/4$
270	$3\pi/2$
315	$7\pi/4$
360	2π

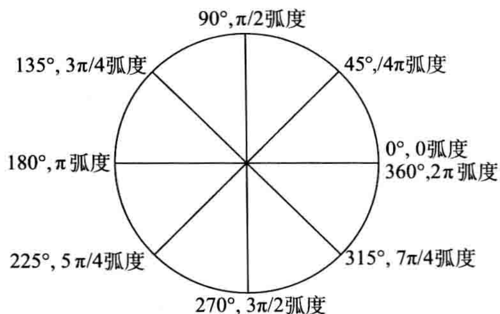


图 8-19　从 0°开始逆时针旋转的角度测量

8.3.2　度/弧度转换

可以利用式（8-13）将度转换为弧度。

$$\text{弧度}=\left(\frac{\pi\ \text{弧度}}{180°}\right)\times\text{度} \tag{8-13}$$

同样地，可以利用式（8-14）将弧度转换为度。

$$\text{度}=\left(\frac{180°}{\pi\ \text{弧度}}\right)\times\text{弧度} \tag{8-14}$$

【例 8-7】　（a）将 60°转换为弧度。（b）将 $\pi/6$ 转换为度。

解：

$$\text{(a)}\ \text{弧度}=\left(\frac{\pi\ \text{弧度}}{180°}\right)\times 60°=\frac{\pi}{3}\text{弧度}$$

$$\text{(b)}\ \text{度}=\left(\frac{180°}{\pi\ \text{弧度}}\right)\times\left(\frac{\pi}{6}\text{弧度}\right)=30°$$

相关问题：（a）将 15°转换为弧度。（b）将 $5\pi/8$ 转换为度。

8.3.3　正弦波角度

正弦波角度的测量基于一个完整周期，涵盖 360°或 2π 弧度，半个周期为 180°或 π 弧度，四分之一周期为 90°或 $\pi/2$ 弧度，依次类推。图 8-20a 显示出以度表示的一个完整周期正弦波的角度，图 8-20b 则是以弧度为单位表示。

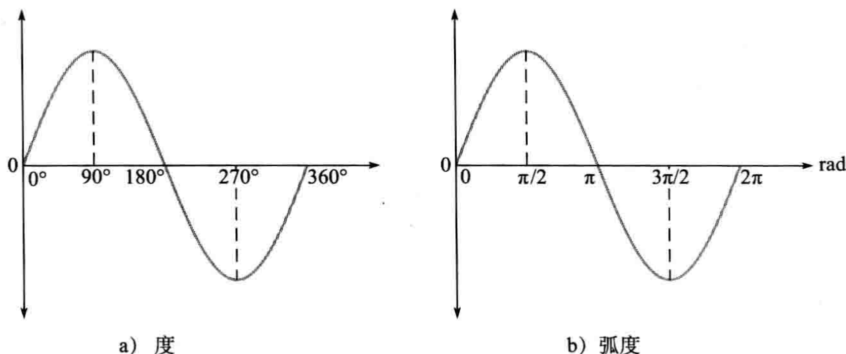


图 8-20　正弦波角度

8.3.4　正弦波的相位

正弦波的相位是指正弦波相对于参考位置的角度测量。图 8-21 画出了正弦波的一个周期作为参考。注意，第一次正向穿过水平轴（过零点）为 0°（0 弧度），正峰值出现在 90°（$\pi/2$ 弧度），负向过零点为 180°（π 弧度），在 270°（$3\pi/2$ 弧度）出现负峰值。在 360°（2π 弧度）完成一周。当正弦波相对于该参考左移或右移时，则存在一个相移。

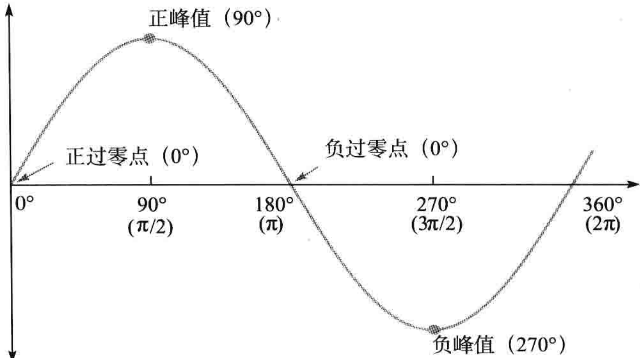
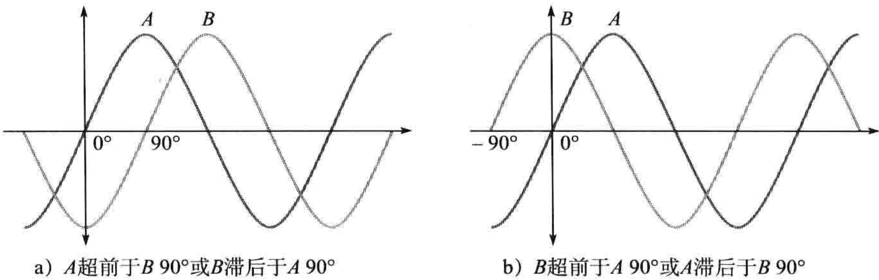


图 8-21　相位参考

图 8-22 显示了正弦波的相位移动。在图 8-22a 中，正弦波 B 相对于正弦波 A 右移了 90°（$\pi/2$ 弧度），因此，正弦波 A 和正弦波 B 之间有一个 90°的相位角。在时间上，正弦波 B 的正峰值时间比正弦波 A 的正峰值出现得晚。在这种情况下，我们说正弦波 B 滞后于正弦波 A 90°或 $\pi/2$ 弧度。换句话说，正弦波 A 超前于正弦波 B 90°。

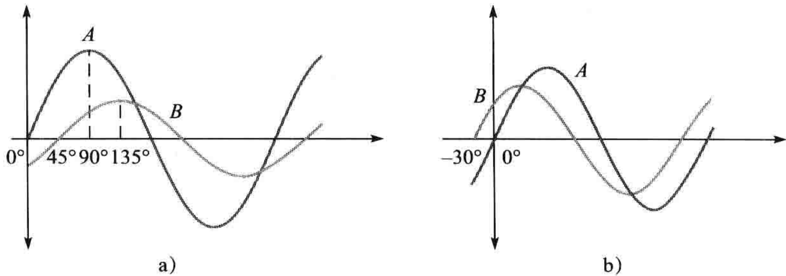


a）A超前于B 90°或B滞后于A 90°　　b）B超前于A 90°或A滞后于B 90°

图 8-22　相位移演示

图 8-22b 显示正弦波 B 相对于正弦波 A 左移 90°，因此，正弦波 A 和正弦波 B 之间有一个 90°的相位角。在这种情况下，正弦波 B 的正峰值时间比正弦波 A 出现得早，因此，我们说正弦波 B 超前于正弦波 A 90°。两种情况，两个波形之间都有一个 90°的相位角。

【例 8-8】　试问图 8-23a 和图 8-23b 中正弦波 A 和 B 之间的相位角是多少？



a）　　b）

图　8-23

解： 在图 8-23a 中，正弦波 A 的过零点在 0°处，而正弦波 B 的对应过零点是在 45°处，因此，两个波形之间有 45°相位角，正弦波 A 超前。

在图8-23b中，正弦波B的过零点在$-30°$处，而正弦波A的对应过零点是在0°处，因此，两个波形之间有30°相位角，正弦波B超前。

相关问题：相对于0°参考点，如果一个正弦波的正过零点在15°处，而另一个正弦波的正过零点在23°处，试问，这两个正弦波之间的相位关系是什么？

当我们在示波器上测量两个波形之间的相移时，应在垂直方向调整波形使它们具有相同的显示幅度，这可通过将示波器的一个通道调节偏离垂直校准并调整相应的波形，直到该通道波形显示的幅值和另一个通道的波形相同。这个过程可以消除由于未在两个波形准确中心位置测量而引起的误差。

8.3.5 多相电源

正弦波相移的一个重要应用是在电力系统中。电力公司产生三相交流电，各相分别相差120°，如图8-24所示。其中的参考点称为中性点。通常情况下，三相电源通过四条导线输送到用户——三条相线加一条中性线。给交流电动机用三相电源供电有许多重要优点，三相电动机与同等的单相电动机相比效率更高、更简单。电动机将在8.7节进一步讨论。

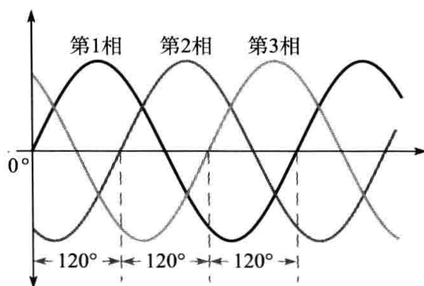
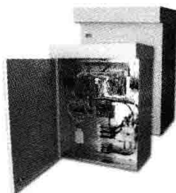


图8-24 三相电源的波形

系统注释 相位转换器

许多工业电动机和其他设备均使用三相电动机，它比单相电动机结构更简单、效率更高且更可靠，在需要频繁起停或逆转的应用场合，例如机床，三相交流电动机特别有用。

然而，由于成本原因，一些小工厂没有安装三相电源，对于这些工厂，利用相位转换器可以由单相电源提供三相电源。单相电源到三相电源的转换有多种不同的技术，此处所示的固态相位转换器使用数字信号处理器（DSP）来监控负载并生成所需的三相电源，如果负载变化，转换器将保持三相电压的恒定。



图片经Phase Technologies公司的许可转载

三相电源由市电公司分配并提供给三个独立的单相系统，如果只用其中一相和中性线向用户供电，则结果是标准120V，这就是单相电源[㊀]。单相电源配送到住宅和小型商业建筑，由两条彼此相差180°的120 V相线和一条中性线构成，中性线在入口处接地。两条相线可以连接成240V电源用于大功率电器（烘干机、空调）。

本节测试题

1. 当一个正弦波的正向过零点出现在0°时，试问下列点出现在什么角度？
   （a）正峰值　（b）负向过零点
   （c）负峰值　（d）第一个周期的末尾
2. 半个周期在__________度或__________弧度内完成。
3. 一个周期在__________度或__________弧度内完成。
4. 试确定图8-25中正弦波B和C之间的相位角。

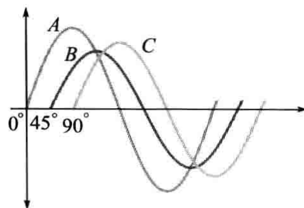


图 8-25

㊀ 我国普通居民供电系统采用220V单相电源。——译者注

8.4 正弦波公式

正弦波可以用波形图表示，纵轴表示电压或电流值，横轴则表示其相位角（度数或弧度），这一波形图可以用数学式子表达。

学习完本节内容，应该能够

- 对正弦波形进行数学分析；
- 表述正弦波公式；
- 利用正弦波公式求瞬时值。

图 8-26 显示了正弦波的一个周期的一般波形图，正弦波的振幅 A 为纵轴电压或电流的最大值，角度沿横轴变化，变量 y 表示在给定角度 θ 时电压或电流的瞬时值。

所有电气正弦波都满足一个特定的数学公式，对应图 8-26，正弦波曲线的一般表达式是

$$y = A\sin\theta \tag{8-15}$$

该式定义了以瞬时值 y 表示的任一点正弦波，等于最大值 A 乘以角度 θ 的正弦（sin）值。例如，某正弦波电压的峰值为 10V，在横轴 60°处的瞬时电压值可以计算如下（此处 $y=v$，$A=V_p$）：

$$v = V_p\sin\theta = 10\text{V} \times \sin60° = 10\text{V} \times 0.866 = 8.66\text{V}$$

图 8-27 在波形曲线上标出了这个特别的瞬时值。在大多数计算器上，先键入角度值，然后按 SIN 键，就可以求得任何角度的正弦值，这时的计算器必须处于度（Degree）模式。

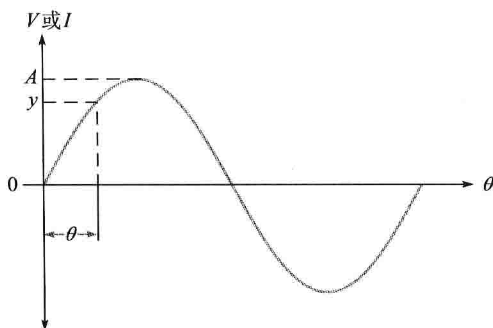


图 8-26 显示振幅和相位的一个周期的正弦波

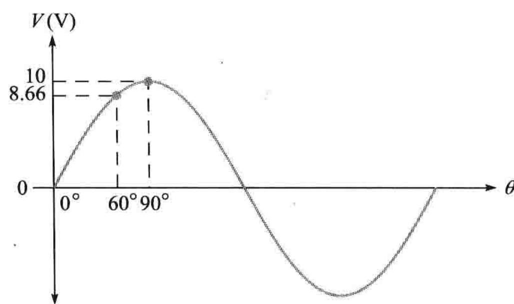


图 8-27 正弦电压在 θ=60°的瞬时值演示

8.4.1 正弦波公式的推导

当沿着正弦波的横轴移动时，角度增加而幅度（沿 y 轴方向的高度）随之变化。在任意给定时刻，正弦波的大小可用相位角和振幅（最大高度）描述，因此，可以用相量来表示正弦波。相量是一个具有大小和方向（相角）的量，相量可用一个绕固定点旋转的箭头表示，箭头的长度为正弦波的峰值（振幅），箭头的角度位置为它旋转的相位角。正弦波的一个完整周期可以被看做相量旋转了 360°。

图 8-28 显示了一个逆时针旋转 360°的相量，如果随着相位角沿横轴移动，将相量前端投影成一个曲线图，则正弦波将被“勾勒出来”，如图 8-28 所示。对应每个相位角的相量位置，有一个相应幅度值。我们看到，在 90°和 270°处，正弦波的幅度最大且等于相量的长度，而在 0°和 180°处，正弦波等于零，因为相量在这些点与横轴重合。

让我们来看看特定角度的相量表示。图 8-29 显示了 45°位置的电压相量及正弦波上的对应点。这一点正弦波瞬时值 v 与相量的位置（角度）和长度（振幅）有关，相量箭头顶端与其下

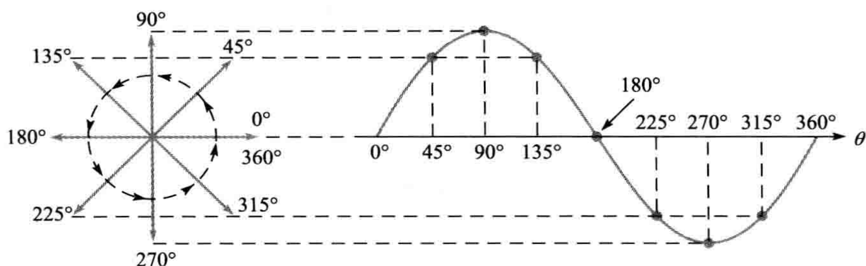


图 8-28　用旋转相量表示正弦波

面的横轴线之间的垂直距离表示该点正弦波的瞬时值。

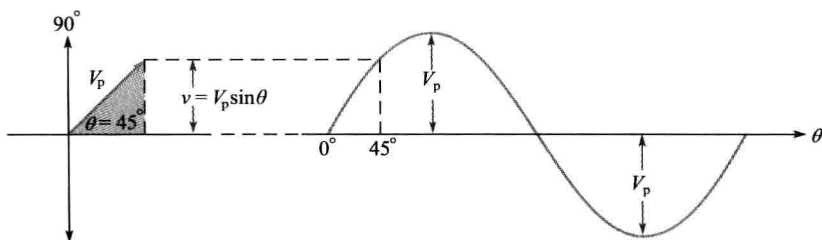


图 8-29　直角三角形正弦波公式推导，$v=V_p\sin\theta$

注意，从相量顶端向下到横轴线画一条垂直线，形成一个直角三角形，如图 8-29 所示。相量的长度是三角形的斜边，相量的垂直投影是三角形的对边。根据三角几何可知，直角三角形的对边等于斜边乘以角度 θ 的正弦。这里相量的长度就是电压正弦波的峰值 V_p，因此，三角形的对边即瞬时值可以表示为

$$v = V_p\sin\theta \tag{8-16}$$

这个公式同样可用于电流正弦波。

$$i = I_p\sin\theta \tag{8-17}$$

8.4.2　移相正弦波的表达

当正弦波相对于参考角度右移（滞后）了一个特定的角度 ϕ（希腊字母）时，如图 8-30a 所示，则一般表达式为

$$y = A\sin(\theta - \phi) \tag{8-18}$$

其中，y 表示瞬时电压或电流，A 表示峰值（振幅）。当相对于参考角度左移（超前）了一个特定的角度 ϕ 时，如图 8-30ϕ 所示，则一般表达式为

$$y = A\sin(\theta + \phi) \tag{8-19}$$

【例 8-9】　求图 8-31 各个正弦波电压在横轴 90°时的瞬时值。

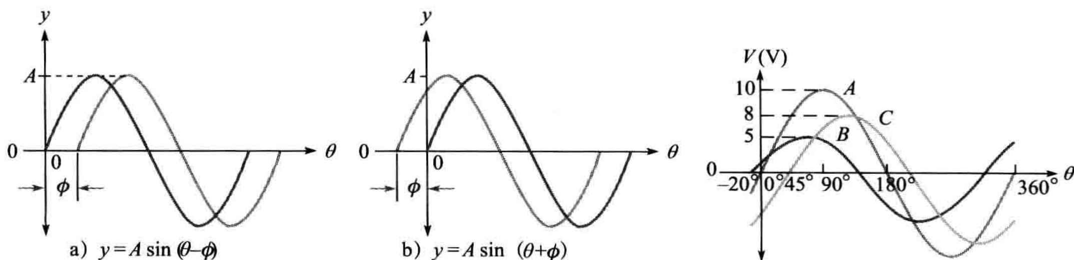


图 8-30　移相正弦波

图　8-31

解：正弦波 A 就是参考，正弦波 B 相对于 A 左移了 20°，所以 B 超前，正弦波 C 相对于 A 右移了 45°，所以 C 滞后。

$$v_A = V_p \sin\theta = 10\text{V} \times \sin 90° = 10\text{V}$$

$$v_B = V_p \sin(\theta + \phi_B) = 5\text{V} \times \sin(90° + 20°) = 5\text{V} \times \sin 110° = 4.70\text{V}$$

$$v_C = V_p \sin(\theta - \phi_C) = 8\text{V} \times \sin(90° - 45°) = 8\text{V} \times \sin 45° = 5.66\text{V}$$

相关问题：若正弦波峰值为 20V，试问相对于 0°参考在 +65°处的瞬时值是多少？

本节测试题

1. 求下列角度的正弦值：
   (a) 30°　　(b) 60°　　(c) 90°
2. 计算图 8-27 中正弦波在 120°处的瞬时值。
3. 求超前零参考 10°的电压正弦波在 45°处的瞬时值（V_p=10V）。

8.5 交流电路分析

当将如同正弦电压这样随时间变化的交流电压施加到电路上时，已经学过的电路定律和功率公式仍然适用。欧姆定律、基尔霍夫定律和功率公式既适用于直流电路，也同样适用于交流电路。

学习完本节内容，应该能够

- 将基本电路定律应用于交流电阻电路；
- 将欧姆定律应用于正弦电源的电阻电路；
- 将基尔霍夫电压定律和电流定律应用于正弦电源的电阻电路；
- 求交流电阻电路的功率；
- 确定含有交流和直流分量的总电压。

若将正弦电压施加在电阻两端，如图 8-32 所示，电路中有一正弦电流。当电压为零时电流为零，当电压最大时电流也最大，当电压改变极性时，则电流反向，因此我们说电压和电流彼此同相位。

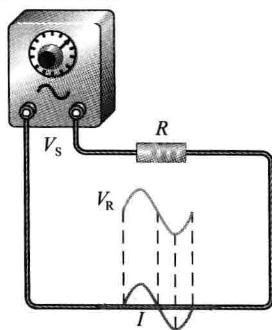


图 8-32　正弦电压产生正弦电流

当将欧姆定律应用到交流电路时，记住电压和电流的表示必须一致，或都使用峰值，或者都使用有效值，或者都使用平均值，以此类推。

基尔霍夫电压定律和电流定律既适用于直流电路也适用于交流电路。图 8-33 显示了基尔霍夫电压定律在带有正弦电压源的电阻电路中的应用。可以看到，电源电压是各个电阻两端电压降之和，这与直流电路完全一样。

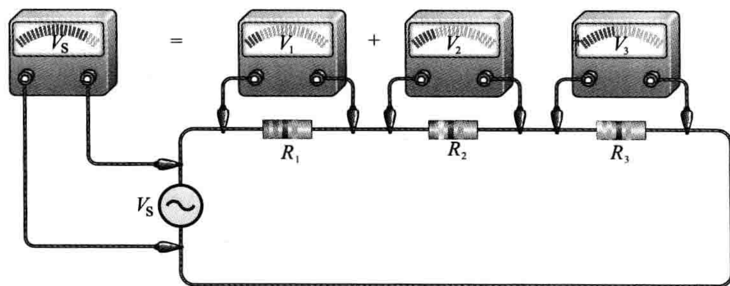


图 8-33　交流电路中基尔霍夫电压定律的演示

交流电阻电路中的功率确定方法与直流电路相同，只是电压、电流必须使用有效值（rms），记住，正弦电压的有效值（rms）等效于产生同样热效应的直流电压值。交流电阻电路功率计算的一般公式为

$$P = V_{rms} I_{rms}$$

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R}$$

$$P = I_{rms}^2 R$$

【例 8-10】　试求图 8-34 电路中每个电阻两端的电压有效值、电流有效值和电路总功率，图 8-34 中给定的电源电压为有效值。

图　8-34

解：电路的总电阻为

$$R_{tot} = R_1 + R_2 = 1.0\text{k}\Omega + 560\Omega = 1.56\text{k}\Omega$$

应用欧姆定律求电流有效值

$$I_{rms} = \frac{V_{S(rms)}}{R_{tot}} = \frac{12.0\text{V}}{1.56\text{k}\Omega} = 7.69\text{mA}$$

各个电阻两端电压有效值为

$$V_{1(rms)} = I_{rms} R_1 = 7.69\text{mA} \times 1.0\text{k}\Omega = 7.69\text{V}$$

$$V_{2(rms)} = I_{rms} R_2 = 7.69\text{mA} \times 560\Omega = 4.31\text{V}$$

总功率为

$$P_{tot} = I_{rms}^2 R_{tot} = 7.69\text{mA}^2 \times 1.56\text{k}\Omega = 92.3\text{mW}$$

相关问题：对峰值为 10V 的电源重新计算本例。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E08—10，测量每个电阻两端的电压有效值，并与计算值比较；将电源电压改为峰值为 10V，测量每个电阻两端的电压并与计算结果比较。

【例 8-11】　图 8-35 中给定的值均为有效值。

（a）求图 8-35a 中未知峰值的电压降。

（b）求图 8-35b 的总电流的有效值。

（c）求图 8-35b 的总功率。

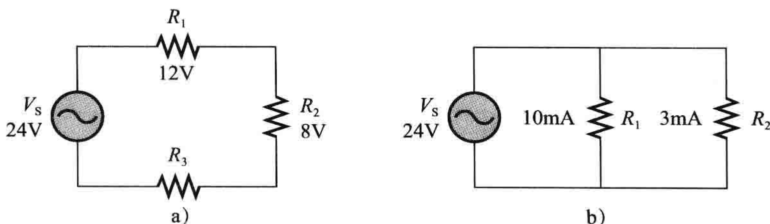


图　8-35

解：（a）利用基尔霍夫电压定律求 V_3。

$$V_S = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V_{3(rms)} = V_{S(rms)} - V_{1(rms)} - V_{2(rms)} = 24\text{V} - 12\text{V} - 8\text{V} = 4\text{V}$$

将有效值转换为峰值。

$$V_{3(p)} = 1.414 V_{3(rms)} = 1.414 \times 4\text{V} = 5.66\text{V}$$

（b）利用基尔霍夫电流定律求 I_{tot}。

$$I_{tot(rms)} = I_{1(rms)} + I_{2(rms)} = 10\text{mA} + 3\text{mA} = 13\text{mA}$$

(c) $P_{tot} = V_{rms} I_{rms} = 24\text{V} \times 13\text{mA} = 312\text{mW}$

相关问题：串联电路具有下列电压降：$V_{1(rms)} = 3.50\text{V}$，$V_{2(p)} = 4.25\text{V}$，$V_{3(avg)} = 1.70\text{V}$，求电源电压的峰峰值。

直流和交流电压叠加

在许多实际电路中，同时存在直流电压和交流电压，放大器电路中交流信号电压叠加在直流工作电压之上就是这样的一个例子。图 8-36 显示了直流电源和交流电源的串联，两个电压代数相加，在电阻两端测量的结果是交流电压“叠加”在直流电平上。

如果 V_{DC} 大于正弦电压的峰值，则交流和直流电压组合是一个不改变极性的正弦波，因此它不是交变的，就是说，正弦波叠加在直流电平之上，如图 8-37a 所示。如果 V_{DC} 小于正弦电压的峰值，则正弦波下半周期的一部分将是负的，如图 8-37b 所示，因此它是交变的。两种情况下，正弦波达到的最大值等于 $V_{DC}+V_p$，最小值为 $V_{DC}-V_p$。

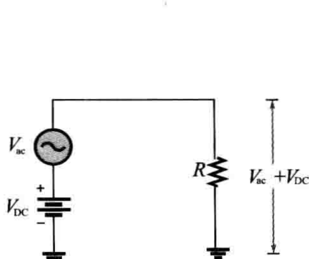


图 8-36 直流和交流电压叠加

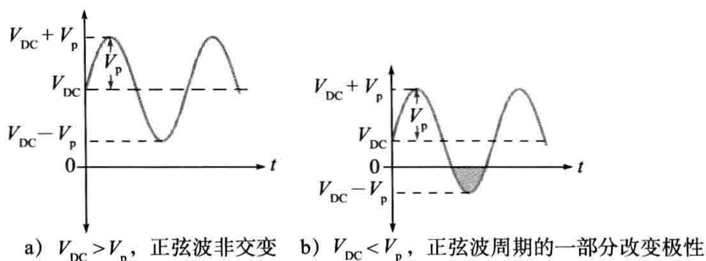


图 8-37 带有直流电平的正弦波

【例 8-12】 求图 8-38 所示的各个电路中电阻两端的最大和最小电压并画出结果波形。

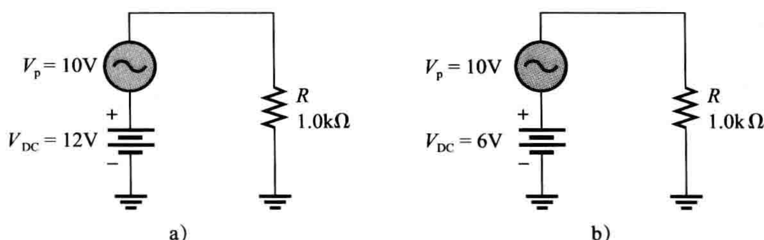


图 8-38

解： 在图 8-38a 中，R 两端的最大电压为

$$V_{max} = V_{DC} + V_p = 12\text{V} + 10\text{V} = 22\text{V}$$

R 两端的最小电压为

$$V_{min} = V_{DC} - V_p = 12\text{V} - 10\text{V} = 2\text{V}$$

因此，$V_{R(tot)}$ 是一个非交变的正弦波，在 +22V和 +2V 之间变化，如图 8-39a 所示。

在图 8-38b 中，R 两端的最大电压为

$$V_{max} = V_{DC} + V_p = 6\text{V} + 10\text{V} = 16\text{V}$$

R 两端的最小电压为

$$V_{min} = V_{DC} - V_p = 6\text{V} - 10\text{V} = -4\text{V}$$

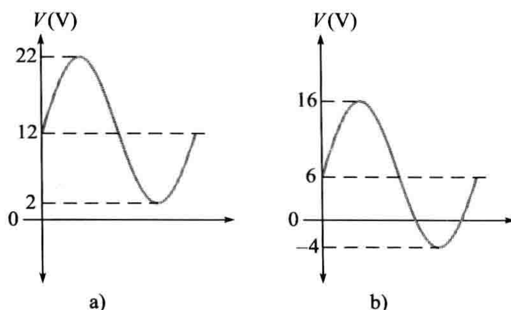


图 8-39

因此，$V_{R(tot)}$ 是一个交变的正弦波，在＋16V 和－4V 之间变化，如图 8-39b 所示。

相关问题：请解释为什么图 8-39a 的波形是非交变的，而图 8-39b 的波形被认为是交变的。

本节测试题

1. 半周期平均值为 12.5V 的正弦电压加到 330Ω 电阻的电路，试问电路的峰值电流是多少？
2. 串联电阻电路的峰值电压分别为为 6.2V、11.3V 和 7.8V，试问电源电压的有效值是多少？
3. 当 V_p＝5V 的正弦波电压加到＋2.5V 直流电压上时，试问结果总电压的最大正值是多少？
4. 在问题 3 中，试问结果电压是否交变极性？
5. 如果问题 3 中直流电压是－2.5V，试问结果总电压的最大正值是多少？

8.6 交流发电机

交流发电机将动能转换成电能。虽然类似于直流发电机，但交流发电机比直流发电机效率高。交流发电机广泛用于车辆、船舶和其他应用中，甚至用于最终输出是直流的场合。

学习完本节内容，应该能够

- 描述交流发电机的发电原理；
- 识别交流发电机的主要部件，包括转子、定子和集电环；
- 解释为什么旋转磁场交流发电机的输出是由定子产生的；
- 描述集电环的作用；
- 解释交流发电机怎样用于产生直流电。

8.6.1 简化的交流发电机

直流发电机与产生交流电压的交流发电机都是基于电磁感应原理：当磁场和导体之间存在相对运动时，产生感应电压。简化的交流发电机中有一个回路在永磁磁极间旋转，旋转回路产生交流电压。交流发电机使用称为集电环的固体环取代直流发电机中使用的裂环，用来连接转子并且输出交流电。除了集电环，交流发电机的最简单形式与直流发电机（参见图 7-37）具有相同的外观，如图 8-40 所示。

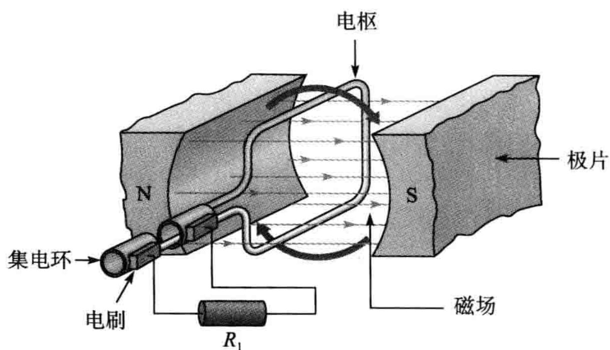


图 8-40 简化的交流发电机

8.6.2 频率

图 8-40 所示的简化交流发电机每转一圈回路产生一个周期的正弦波，正、负峰值发生在回路切割磁力线最大的两个位置。回路旋转的速率确定了一个完整周期的时间及频率，如果旋转一周需要 1/60s，则正弦波的周期就是1/60s，频率为 60Hz，因此，回路转动的速度越快，频率越高。

实现较高频率的另一种方法是使用多个磁极。若用四个磁极取代两个磁极，如图 8-41 所

示，导体每半圈就通过一个北极和南极，因此频率加倍。根据需要，交流发电机可以有更多磁极，有些多达100个。根据磁极数目和转子速度，按照下面的等式确定频率：

$$f = \frac{Ns}{120} \tag{8-20}$$

式中，f是频率，单位为赫兹（Hz）；N是磁极数目；s是转子转速，以每分钟转数计（r/m）。

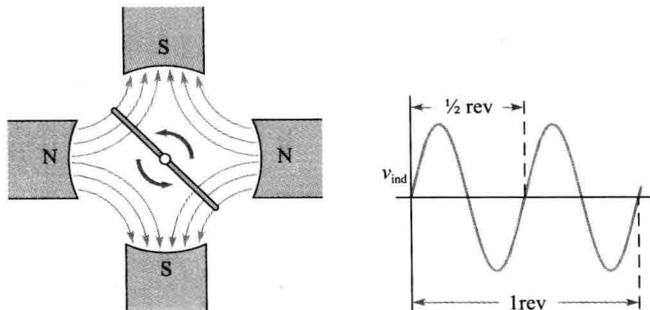


图8-41　同样转速四磁极产生的频率是两磁极的两倍

【例8-13】　假设大型交流发电机的涡轮机转速为300r/m，有24个磁极。试问输出频率为多少？

解：

$$f = \frac{Ns}{120} = \frac{24 \times 300\text{r/m}}{120} = 60\text{Hz}$$

相关问题：为了产生50Hz输出，试问转子的转速必须为多少？

8.6.3　实际交流发电机

简化交流发电机的单回路只能产生一个微小的电压，在实际交流发电机中，有数百个回路绕在磁心上形成转子。实际交流发电机通常用转子周围的固定绕组取代永久磁铁。根据发电机类型不同，固定绕组可以提供磁场（这种情况称为励磁绕组）或作为固定导体产生输出（这种情况，固定绕组是电枢绕组）。

旋转电枢交流发电机　在旋转电枢交流发电机中，磁场是固定的，通过直流馈电作为永久磁铁或电磁铁。使用电磁铁，由励磁绕组代替永久磁铁提供固定的磁场与转子线圈相互作用。电源在旋转组件中产生，通过集电环输送给负载。

在旋转电枢交流发电机中，转子是产生电源的组件。除了数百绕组，实际旋转电枢交流发电机通常有许多交替北极和南极形成的定子极对，以提高输出频率。

旋转磁场交流发电机　因为电流必须全部通过集电环和电刷输出，旋转电枢交流发电机一般仅限于小功率的场合。为了避免这个问题，旋转磁场交流发电机从定子线圈输出，而且使用旋转磁铁，因此而得名。小型交流发电机可使用永久磁铁作为转子，但大多数交流发电机都使用由绕线转子形成的电磁铁。相对小的直流量被馈送到转子（通过集电环）为电磁铁供电，当旋转磁场扫描定子绕组时，在定子中产生电源，因此，这种情况下定子是电枢。

图8-42显示了旋转磁场交流发电机产生三相正弦波的原理（为简单起见，采用永久磁铁转子），当转子的北极和南极交替地扫过定子绕组时，在每组定子绕组中产生交流电。如果北极产生正弦波正的部分，南极则产生正弦波负的部分，因此，旋转一圈产生一个完整的正弦波。每个绕组都有正弦波输出，因为绕组相隔120°分布，所以三个正弦波的相位也移位120°，这就产生了三相电源输出，如图8-42所示。由于发电效率高，大多数交流发电机都产生三相电压，被广泛应用于工业领域。如果最终输出是直流（DC）电压，则三相电压转换为直流电压更容易。

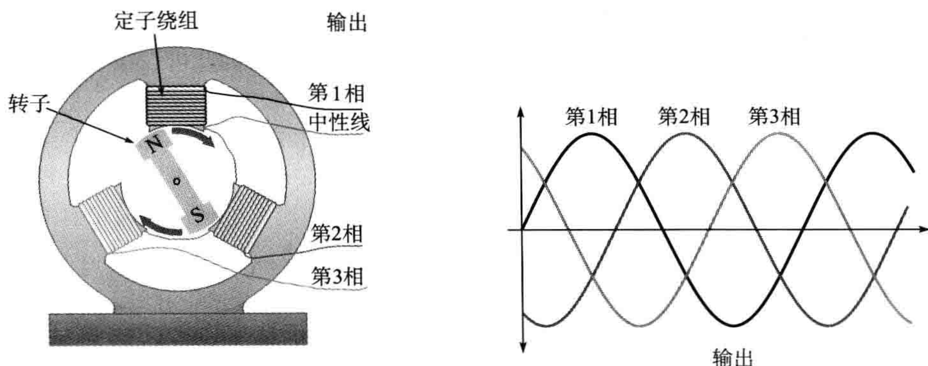


图 8-42 转子显示为产生强磁场的永久磁铁，当它扫描每个定子绕组时在绕组两端产生正弦波，中性线为参考点

8.6.4 转子电流

绕线转子对于控制交流发电机有重要优势，绕线转子能够通过控制转子电流来控制磁场强弱，从而控制输出电压。对于绕线转子，必须给转子提供直流电流，此电流一般通过电刷和集电环馈送，集电环做成连续环（不像换向器是分割开的）。不像等效直流发电机电刷需要通过所有输出电流，这里电刷只需要通过转子磁化电流，因此使用寿命更长，且体积更小。

在绕线转子式交流发电机中，电刷和集电环仅仅通过用来维持磁场的直流电流，这个直流电流通常是从定子输出电流取一小部分转换为直流得到。发电站的大型交流发电机可以有一个单独的直流发电机，称为*励磁机*，由它给励磁线圈提供电流。励磁机对输出电压变化的响应速度非常快，从而保持了交流发电机输出电压的恒定，这是大功率交流发电机必须考虑的重要因素。某些励磁机使用固定磁场而将电枢安装在旋转主轴上，这样系统就无需电刷，因为励磁机的输出就在旋转轴上，无刷系统消除了大型发电机清洗、修理、更换电刷等主要维修问题。

8.6.5 应用

几乎所有现代汽车、卡车、拖拉机和其他车辆均使用交流发电机。在车辆中，输出的通常取自定子绕组三相交流电，然后再利用安装在交流发电机壳体内的二极管转换为直流（二极管是一种固态器件，仅允许电流在一个方向流过）。交流发电机内部供给转子的电流受稳压器控制，稳压器的作用是在发动机转速变化或负载变化时保持输出电压相对恒定。交流发电机已在汽车和大多数其他应用中取代了直流发电机，因为它们效率更高且更可靠。

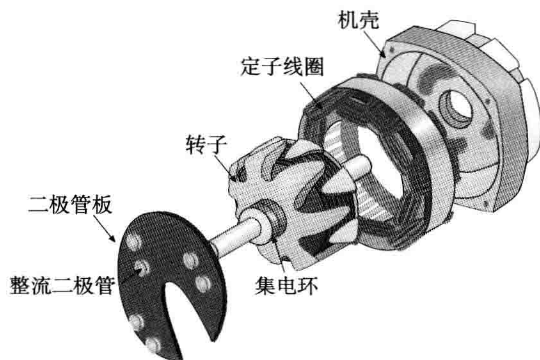


图 8-43 小型交流发电机转子、定子和产生直流的二极管板简化视图

小型交流发电机（例如，在汽车中使用的）的重要组成部分如图 8-43 所示，类似 7.6 节讨论的自激式发电机，开始时转子具有少量的剩磁，所以只要转子开始旋转，即在定子中产

生交流电压，由一组整流二极管将该交流转换为直流，其中一部分直流用来给转子提供电流，其余可用于负载。转子所需的电流量远小于交流发电机的总电流，因此可以很容易地提供所需的电流给负载。

除了产生的效率高之外，三相电压通过在每个绕组中使用两个二极管还可很容易地产生稳定的直流输出。由于车辆的充电系统和负载需要直流，交流发电机内部用安装在二极管板上的整流二极管阵列将输出转换为直流，因此，标准的三相汽车交流发电机内部通常有6个二极管将输出转换为直流。(有些发电机有6个独立的定子线圈和12个二极管。)

系统举例8-2 汽车充电系统

一个基本的汽车充电系统电路原理图如图8-44所示，交流发电机是该系统的核心。交流发电机提供交流电源，由二极管阵行列进整流（转换为直流），直流经粗导线送到电池。

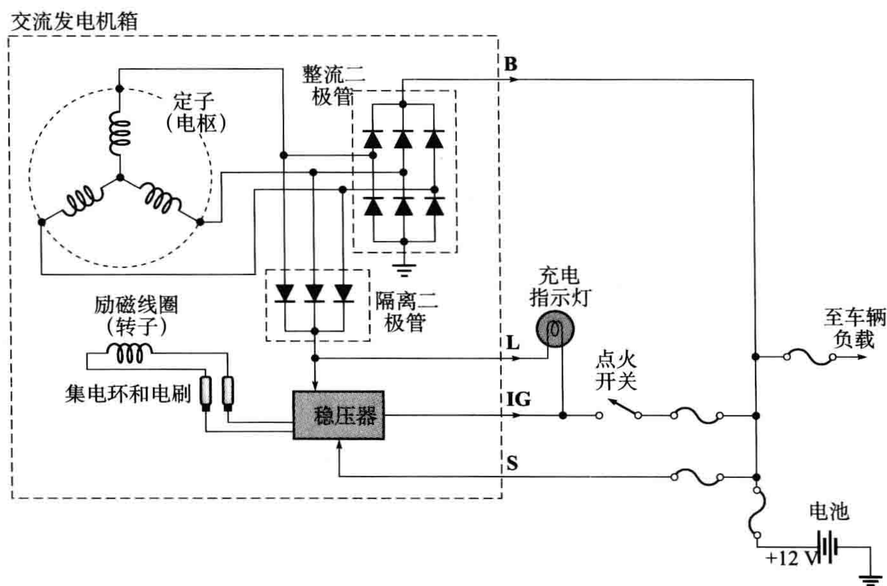


图8-44 基本汽车充电系统

交流发电机通常有四个端子接到充电系统，分别标记为B、L、IG和S。端子B连接到电池承载充电电流。端子L连接到位于仪表板上的充电指示灯，当它两端有电压差时发光，如果灯泡两端电压相等则关闭。端子IG连接到点火开关的运行侧，由它激活稳压器，如果指示灯两侧任一电压移去，指示灯亮，说明充电系统有问题。端子S是“传感”连接，连接到电池为稳压器提供电池电压监控。

本节测试题

1. 试问影响交流发电机频率的两个因素是什么？
2. 在旋转磁场交流发电机中从定子输出的优点是什么？
3. 什么是励磁机？
4. 汽车交流发电机中二极管的用途是什么？

8.7 交流电动机

电动机是最常见的电磁设备，是电力系统中交流电源的最常见负载。交流电动机用于带动

热泵、冰箱、洗衣机、烘干机和真空吸尘器等家电。在工业领域，交流电动机用在许多方面，物料的运送、处理以及制冷和加热单元、机械操作、泵等都要用到交流电动机。本节介绍两种主要的交流电动机——感应电动机和同步电动机。

学习完本节内容，应该能够

- 解释电动机将电能转换为转动的原理；
- 列举出感应电动机和同步电动机的主要区别；
- 解释交流电动机产生磁场旋转的原理；
- 解释感应电动机产生扭矩的原理。

8.7.1 交流电动机的分类

交流电动机主要分为两类：感应电动机和同步电动机。对于给定的应用选择哪一类最适合有好几个考虑的因素，这些因素包括速度和功率的要求、额定电压、负载特性（如所需的起动转矩）、效率的要求、维护的要求和工作环境（如水下作业或温度）等。

感应电动机之所以如此命名是因为磁场在转子中感应电流并建立磁场，该磁场与定子磁场相互作用。通常情况下，转子中没有电气连接㊀，所以无需易被磨损的集电环和电刷，转子电流是由电磁感应而产生的。

同步电动机的转子与定子旋转磁场同步转动（以相同的速率），同步电动机用于需要保持恒定速度的应用场合。同步电动机不能自起动，必须得到外部源或内置起动绕组的起动转矩才能起动。与交流发电机类似，同步电动机使用集电环和电刷向转子提供电流。

8.7.2 旋转定子磁场

同步交流电动机和感应交流电动机的定子绕组布局相同，这种布局使得定子磁场旋转。定子磁场的旋转相当于磁铁做圆周运动，除电产生的旋转磁场之外，没有移动的部件。

怎样才能使定子磁场旋转而定子本身并不移动呢？旋转磁场是由不断变化的交流电本身产生的，让我们来看看三相定子旋转磁场，如图 8-45 所示。注意，三相中的一相在不同时刻起“主导”作用。当第一相在 90°时，第一相绕组电流最大，其他相绕组电流较小，因此，定子磁场指向第一相定子绕组。随着第一相电流的下降，第二相电流增大，磁场朝第二相绕组旋转，第

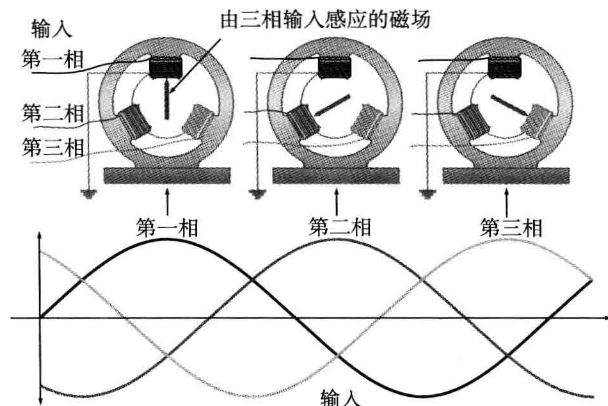


图 8-45　加到定子的三相电源产生的磁场净如箭头所示，转子（未示出）响应该磁场而转动

㊀ 绕线转子电动机是一个例外，这是一种大型感应电动机，通常应用有限。

二相电流达到一个最大值时，磁场指向第二相绕组。随着第二相电流的下降，第三相电流增大，磁场向第三相绕组旋转。当磁场返回到第一相绕组后，重复上述过程。因此，磁场旋转的速率由所加电压的频率确定。更详细的分析表明，磁场的大小不变，只是磁场的方向变化。

小贴士 大功率电动机的电机新技术将采用高温超导体（HTS），新技术大大降低了动辄数百吨的大型电动机的体积和重量，船舶推进电动机是一个应用实例，这将降低燃油消耗并在船上腾出空间。49 000 HP HTS 电动机已通过海军的初步测试，不久将被安装在海军舰艇上。

随着定子磁场的旋转，同步电动机的转子与磁场同步转动，而感应电动机的转子转动则滞后于磁场，定子磁场的旋转速率称为电动机的同步转速。

8.7.3 感应电动机

单相和三相感应电动机的工作原理在本质上是相同的。两者都使用上面描述的旋转磁场，但单相电动机需要起动绕组或其他方法产生转矩来起动电动机，而三相电动机则是自起动的。当在单相电动机中采用起始绕组时，随着电动机速度加快，通过一个机械离心开关将其从电路中移除。

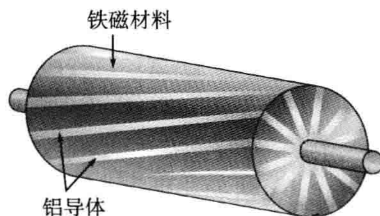


图 8-46 笼型转子示意图

感应电动机转子的磁心由铝框构成，铝框形成转子中循环电流的导体（一些大型感应电动机采用铜条），铝框在外观上类似宠物松鼠的运动轮毂（常见于 20 世纪初），因此被形象地称为鼠笼，如图 8-46 所示。铝鼠笼本身是电气路径，嵌在铁磁材料中为转子提供低磁阻磁路。此外，转子有冷却翅片，可以和鼠笼模塑成同一块铝，整个组件必须平衡以使旋转轻松，没有振动。

感应电动机的工作 当定子产生的磁场旋转经过电感电动机的鼠笼时，鼠笼中产生电流，该电流又产生磁场，与定子的旋转磁场相互作用，从而使转子开始旋转。转子试图“赶上”旋转磁场，但始终不能，这就是已知的转差条件。*转差*定义为定子的同步转速和转子转速之间的差。转子永远无法达到定子磁场的同步转速，因为如果达到了，就不再切割磁力线，转矩将下降到零，没有转矩，转子也就无法转动。

最初，在转子开始转动前，没有反电动势（emf），定子电流大。随着转子的旋动加快，产生阻碍定子电流的反电动势。随着电动机转速的提高，产生的转矩与负载平衡，电流仅仅满足保持转子的转动。由于反电动势的存在，电动机的运行电流明显低于初始起动电流。运行中如果电动机的负载增大，电动机转速将减慢，从而产生较小的反电动势，这将增大电动机的电流，从而增大转矩，使之适用于增加的负载。因此，感应电动机可以在一定转速和转矩范围内工作，最大转矩约发生在转子转速为同步速度的 75%时。

8.7.4 同步电动机

上面提到，如果感应电动机以同步速度运行，将没有转矩输出，所以感应电动机的运行转速必须比同步速度低，这取决于负载状况。同步电动机则是以同步速度运行，并且仍然能为不同的负载提供所需要的转矩。改变同步电动机转速的唯一方法是改变频率。

同步电动机在所有负载条件下都维持恒定转速，这是它用于某些需要时钟或定时的工业操作和应用（例如，望远镜的驱动马达或图表记录器）中的主要优点。事实上，同步电动机的第一个应用就是电气时钟（1917 年）。

大型同步电动机的另一个重要优点是其工作效率，尽管其原始成本高于感应电动机，但是在未来几年内运行节省的能源往往能抵消初始成本差异。

同步电动机的工作　同步电动机定子磁场的旋转本质上与感应电动机相同，两种电动机的主要区别在于转子。感应电动机的转子与电源电气绝缘，而同步电动机则使用磁铁跟随定子磁场旋转。小型同步电动机使用永久磁铁的转子，而较大的同步电动机使用电磁铁转子。当使用电磁铁转子时，类似在交流发电机的情况，通过集电环从外部电源供给转子直流电流。

本节测试题

1. 试问感应电动机与同步电动机的主要区别是什么？
2. 随着定子旋转磁场的转动，其磁场大小会怎样变化？
3. 试问鼠笼的用途是什么？
4. 在电动机中，转差是什么意思？

8.8　非正弦波形

正弦波是电子电路中重要的波形，但不是唯一的交流或随时间变化的波形。另外两种主要的波形是脉冲波形和三角波形。

学习完本节内容，应该能够

- 识别基本非正弦波形的特性；
- 讨论脉冲波形的性质；
- 定义占空比；
- 讨论三角波和锯齿波的性质；
- 讨论波形中的谐波成分。

8.8.1　脉冲波形

脉冲基本上可以描述为从一个电压或电流水平（基线）非常快速地转换（前沿）到另一个电平，经过一段时间间隔后，又非常快速地转换（后沿）回到原来的基线水平。这种电平的转换称为阶跃，理想脉冲由两个反向等幅的阶跃构成。正向跃变的前沿或后沿称为上升沿，负向跃变的前沿或后沿称为下降沿。

图 8-47a 显示了一个理想正脉冲，由两个幅度相等方向相反的阶跃构成。两个阶跃相隔的时间称为脉冲宽度，图 8-47b 显示了一个理想负脉冲。从基线测量的脉冲高度是电压（或电流）的幅度。通常，将所有脉冲理想化（阶跃瞬时完成，脉冲为标准的矩形）可使分析简化。

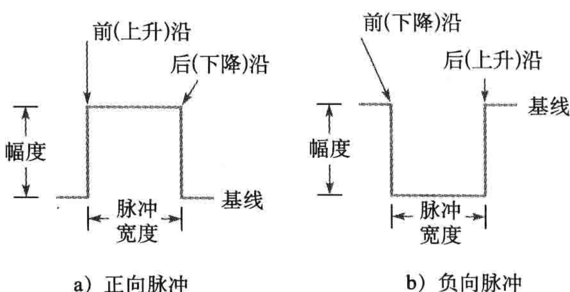


图 8-47　理想脉冲

但是，实际脉冲不可能是理想的，脉冲无法从一个电平瞬间变化到另一个电平，转换（阶跃）总是需要时间，如图 8-48a 所示。我们看到，脉冲从较低的值上升到较高的值有一个时间间隔，这个时间间隔称为上升时间 t_r。上升时间是脉冲从其幅度的 10％上升到幅度的 90％所需的时间。

脉冲从较高的值下降到较低的值也有一个时间间隔，该时间间隔称为下降时间 t_f。下降时间是脉冲从其幅度的 90％下降到幅度的 10％所需的时间。

由于脉冲的前沿和后沿不再是垂直的，因此非理想脉冲的脉冲宽度（t_W）也需要有一个确切的定义。

脉冲宽度为脉冲前沿幅度50%处到脉冲后沿幅度50%处的时间间隔。

脉冲宽度如图8-48b所示。

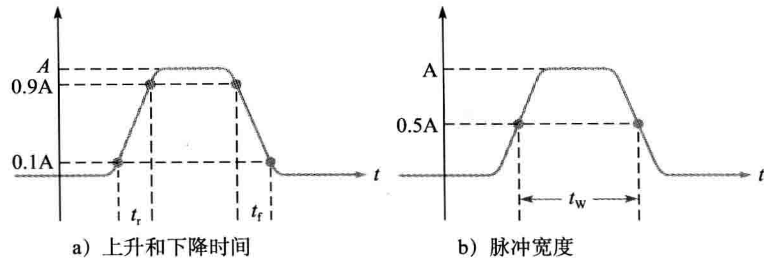


图8-48 非理想脉冲

重复脉冲 任何以固定时间间隔重复自身的波形是周期性的。图8-49显示了一些周期性脉冲波形的例子，注意到每种情况脉冲都以规则的时间间隔重复，脉冲的重复率就是脉冲重复频率，是波形的基波频率，以赫兹或每秒钟的脉冲个数表示。从一个脉冲到下一个脉冲对应点的时间为周期（T），频率和周期之间的关系与正弦波相同，为 $f=1/T$。

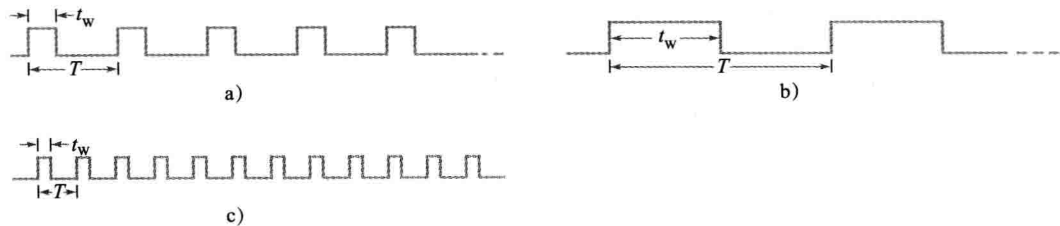


图8-49 重复脉冲波形

周期性脉冲波形的一个重要特征是占空比。占空比为脉冲宽度（t_W）与脉冲周期（T）的比值，常用百分比表示。

$$\text{百分比占空比}=\left(\frac{t_W}{T}\right)\times 100\% \tag{8-21}$$

【例8-14】 试确定图8-50中脉冲波形的周期、频率和占空比。

解： 图8-50可以看出，周期为

$$T=10\mu s$$

利用式（8-1）和式（8-21）确定频率和占空比。

$$f=\frac{1}{T}=\frac{1}{10\mu s}=100\text{kHz}$$

$$\text{百分比占空比}=\frac{t_W}{T}\times 100\%=\frac{1\mu s}{10\mu s}\times 100\%=10\%$$

相关问题：某脉冲波形的频率为200Hz，脉冲宽度为0.25μs，试求百分比占空比。

方波 方波是一种占空比为50%的脉冲波形，因此，脉冲宽度等于半个周期，方波如图8-51所示。

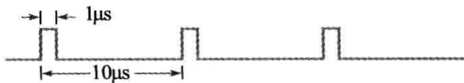


图 8-50

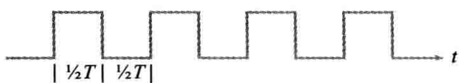


图8-51 方波

脉冲波形的平均值　脉冲波形的平均值等于其基线值加上振幅与占空比的乘积。正向脉冲的低电平或负向脉冲的高电平为基线。平均电压的计算公式如下：

$$V_{avg} = \text{基线} + \text{占空比} \times \text{幅度} \tag{8-22}$$

下列例题说明了脉冲波形的平均电压的计算方法。

【例 8-15】　试确定图 8-52 中各个正向脉冲波形的平均电压。

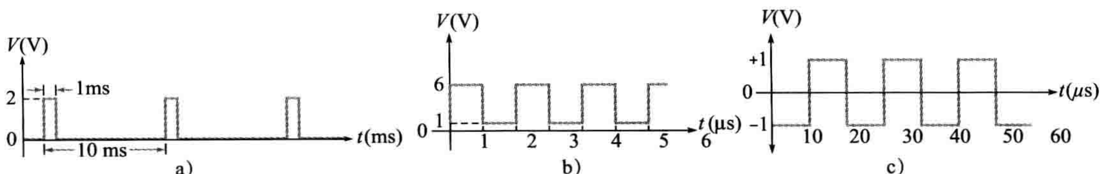


图　8-52

解： 在图 8-52a 中，基线在 0V，幅度为 2V，占空比为 10%。平均电压为

$$V_{avg} = \text{基线} + \text{占空比} \times \text{幅度}$$
$$= 0\text{V} + 0.1 \times 2\text{V} = 0.2\text{V}$$

图 8-52b 的波形基线为+1V，幅度为 5V，占空比为 50%。平均电压为

$$V_{avg} = \text{基线} + \text{占空比} \times \text{幅度}$$
$$= 1\text{V} + 0.5 \times 5\text{V} = 1\text{V} + 2.5\text{V} = 3.5\text{V}$$

图 8-52c 的波形为方波，基线在−1V，幅度为 2V，占空比为 50%。平均电压为

$$V_{avg} = \text{基线} + \text{占空比} \times \text{幅度}$$
$$= -1\text{V} + 0.5 \times 2\text{V} = -1\text{V} + 1\text{V} = 0\text{V}$$

这是一个交变方波，类似交变正弦波，整个周期的平均电压为零。

相关问题：如果图 8-52a 中波形的基线移到+1V，试问平均电压为多少？

8.8.2　三角波与锯齿波

三角波和锯齿波由电压或电流的斜坡形成。斜坡是电压或电流的线性增大或减小。图 8-53 分别显示了正向和负向斜坡，图 8-53a 的斜坡具有正斜率，图 8-53b 的斜坡具有负斜率。电压斜坡的斜率为 $\pm V/t$，而电流斜坡的斜率为 $\pm I/t$ 。

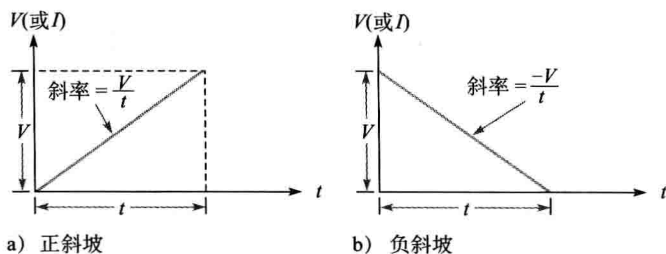


图 8-53　电压斜坡

【例 8-16】　试问图 8-54 中电压斜坡的斜率是多少？

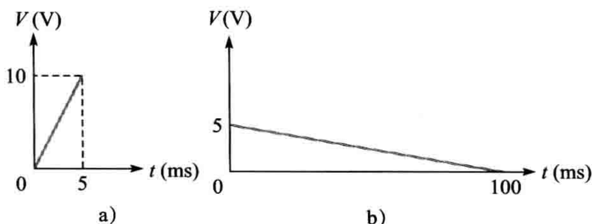


图　8-54

解： 在图 8-54a 中，电压从 0V 增到+10V 用时 5ms，因此，$V = 10\text{V}$，$t = 5\text{ms}$，斜率为

$$\frac{V}{t}=\frac{10\text{V}}{5\text{ms}}=2\text{V/ms}$$

在图 8-54b 中，电压从+5V 降到 0V 用时 100ms，因此，$V=-5\text{V}$，$t=100\text{ms}$，斜率为

$$\frac{V}{t}=\frac{-5\text{V}}{100\text{ms}}=-0.05\text{V/ms}$$

相关问题：某电压斜坡的斜率为+12V/μs，如果斜坡从零开始，试问 0.01ms 时的电压为多少？

三角波 图 8-55 显示了由斜率相等的正向和负向斜面构成的三角波形。该波形的周期可用两个相邻正（或负）峰值的距离测量得到，如图所示。这种特殊的三角波形是交变的，平均值为零。

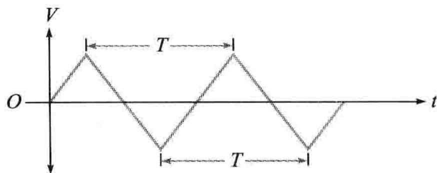


图 8-55 交变三角波

图 8-56 显示了一个非零平均值的三角波，三角波的频率确定方法与正弦波相同，即 $f=1/T$。

锯齿波 锯齿波实际上是一个特殊的三角波，由两个斜坡构成，其中一个持续时间长，另一个持续时间短。锯齿波形用在许多电子系统中，例如，锯齿波形用在自动测量仪器、控制系统以及某些类型的显示器，包括模拟示波器。

图 8-57 是一个锯齿波形的例子，正向斜坡持续时间相对较长，跟随其后的负向斜坡持续时间相对较短。

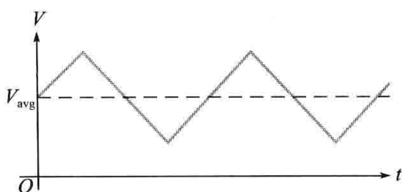


图 8-56 非交变三角波

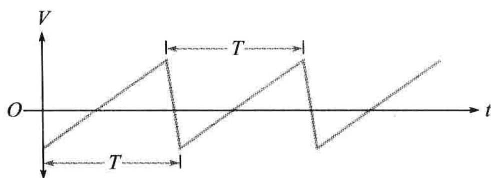


图 8-57 交变锯齿波

8.8.3 谐波

非正弦的重复波形包含基频和谐频的正弦波，基频就是波形的重复频率，而谐波是更高频率的正弦波，其频率是基频的整数倍。

奇次谐波 奇次谐波的频率为波形基频的奇数倍。例如，1kHz 方波由 1kHz 基波和 3kHz、5kHz、7kHz 等奇次谐波构成，这里 3kHz 频率为三次谐波、5kHz 频率为五次谐波等。

偶次谐波 偶次谐波的频率为基波频率的偶数倍。例如，如果某波形的基频为 200Hz，二次谐波为 400Hz、四次谐波为 800Hz、六次谐波为 1200H，以次类推，这些是偶次谐波。

合成波形 纯正弦波的任何变化都将产生谐波，非正弦波是基波和谐波的合成。有些波形只有奇次谐波，有些波形只有偶次谐波，还有的波形既含有奇次谐波又含偶次谐波。波的形状取决于其谐波含量，一般来说，基波频率和前几次谐波在确定波形状时最重要。

方波是只包含基频和奇次谐波的一例波形，每个点的基波和各奇数谐波的瞬时值代数相加，得到的曲线具有方波波形，如图 8-58 所示。图 8-58a 为基波和三次谐波叠加产生的波形，开始像一个方波；图 8-58b 由基波、三次谐波和五次谐波叠加产生，已与方波非常相似；图 8-58c把七次谐波叠加上去，所得波形更加接近方波。叠加的谐波次数越多，越接近方波。

小贴士 示波器的频率响应限制波形显示的精确度，要观察脉冲波形，示波器的频率响应必须足够高覆盖波形的所有重要谐波。例如，100MHz 示波器将使 100MHz 脉冲波形失真，因

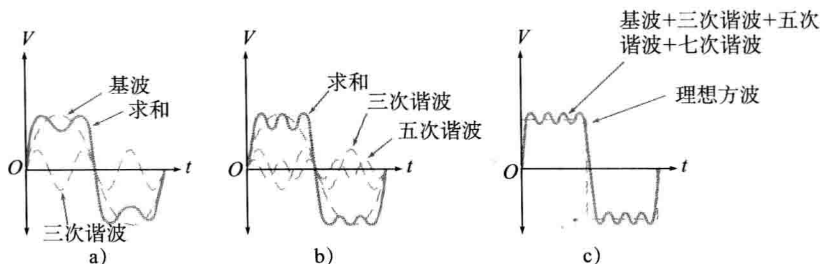


图 8-58　奇次谐波组合形成方波，该图是一个理论上从$-\infty$延伸到$+\infty$的连续脉冲

为三次、五次和高次谐波衰减很大。

系统举例 8-3　信号的频域分析

我们已经学过，信号可以认为是由各种正弦波组合而成的，所有的波形都能够分解成一系列相关的正弦波。这些正弦波的振幅作为频率的函数图称为频域图（域是指独立的变量），同一波形也可以绘制为以时间作为独立变量的函数图，称为时域图。图 8-59 显示了一个周期信号的时域和频域图，时域波形图显示的是各个频率成分的叠加，而频域图则是把信号分解成各个频率成分。

时域和频域是描述电信号的两个主要域，约瑟夫·傅里叶于 1807 年描述热流时首次提出时域和频域之间关系的数学描述，因此，时域和频域间的转换称为傅里叶分析法。

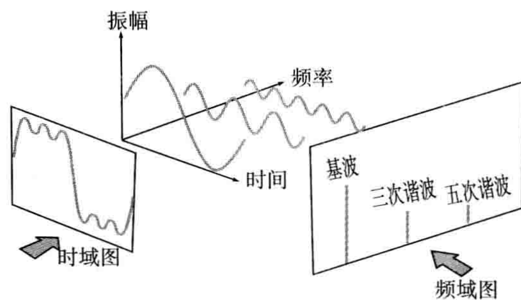


图 8-59　信号的时域和频域观察

频谱分析仪是一种广泛应用于射频（RF）和微波系统的仪器，频谱分析仪将关注的信号分解成它的正弦分量，并把这些分量显示出来。而 8.9 节介绍的示波器则是一个时域仪器（虽然有些专用示波器也可以显示频域）。

许多系统使用射频器件，包括手机、无线局域网、某些远程控制、医疗器械、各种跟踪设备（跟踪包裹，甚至牲畜）。这些系统的使用对带宽的需求显著增加，各个系统之间存在着干扰问题。干扰频率的测试就是一种频域测量，频谱分析仪是理想选择，频谱分析仪也可用于测量频率、功率、调制、失真和噪声水平等。

本节测试题

1. 试给出下列参数的定义
   (a) 上升时间　　(b) 下降时间
   (c) 脉冲宽度
2. 在某个重复性正向脉冲波形中，脉冲宽度为 200μs，每毫秒出现一次，试问该波形的频率是多少？
3. 试确定图 8-60a 波形的占空比、幅度和平均值。
4. 试问图 8-60b 三角波的周期是多少？
5. 试问图 8-60c 锯齿波的频率是多少？

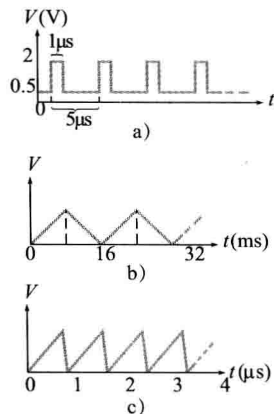


图　8-60

6. 试给出基波频率的定义。
7. 试问 1kHz 基频的二次谐波是多少？
8. 试问周期为 10μs 方波的基频是多少？

8.9 示波器

示波器是一种广泛使用的通用测试仪器，用于观察和测量波形。

学习完本节内容，应该能够

- 使用示波器测量波形；
- 识别常见的示波器控制；
- 测量波形的幅度；
- 测量波形的频率和周期。

示波器基本上是一种图形显示设备，用于在屏幕上显示电信号的轨迹。大多数情况图形显示信号随时间变化的情形。显示屏的纵轴表示电压，横轴表示时间。利用示波器可以测量信号的幅度、周期和频率，也可以测量脉冲波形的脉冲宽度、占空比、上升时间和下降时间。大多数示波器可以在屏幕上至少同时显示两个信号，以便观察信号之间的关系。图 8-61 显示了两种不同的数字示波器。

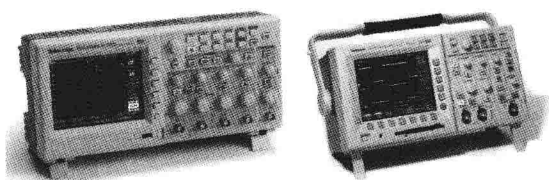


图 8-61 数字示波器

Copyright ©Tektronix，图片经许可转载

模拟和数字两种基本类型的示波器都可以用来观察数字波形。老式模拟示波器的工作原理是，当阴极射线管（CRT）电子束在屏幕上扫描时，用被测量波形直接控制电子束向上和向下运动，电子束在屏幕上描绘出波形图。数字示波器则在模-数转换器（ADC）中通过采样处理将被测波形转换成数字信息，然后在屏幕上重构波形。

数字示波器比模拟示波器使用得更为广泛，然而，在许多应用中两类示波器都可以使用，且各具特点，都有更适合的应用情况。模拟示波器能“实时”显示波形，而数字示波器则更适合于测量可能是随机发生的或只有一次的瞬态脉冲，另外，数字示波器可以将被测波形的有关信息存储起来，供以后重新观看、打印或由计算机或其他工具详细分析。

8.9.1 模拟示波器的基本原理

要测量电压，必须将示波器探针连接到电路中的电压测试点，一般使用×10 探针将信号幅度减小（衰减）为原来的 1/10。信号通过探头输入到垂直电路，根据信号的实际幅度及示波器显示要求，通过垂直控制的设置，对信号进行衰减或放大；然后由垂直电路驱动 CRT 垂直偏转板；同时，将信号输入到触发电路，触发水平电路的锯齿波起动电子束在屏幕上水平扫描，电子束每秒钟扫描多次，使得光束在屏幕上形成实线波形。模拟示波器的基本操作如图8-62所示。

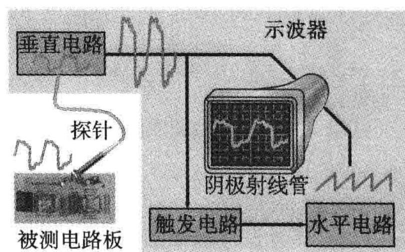


图 8-62 模拟示波器框图

8.9.2 数字示波器的基本原理

数字示波器的有些部件与模拟示波器相似，然而，数字示波器比模拟示波器更复杂，典型的数字示波器通常采用液晶显示屏而不是阴极射线管。数字示波器不是实时地显示波形，而是首先获取被测量的模拟波形，利用模-数转换器（ADC）将其转换为数字格式，将该数字数据

存储和处理，然后通过重建和显示电路将信号以其原来的模拟形式显示出来。图 8-63 所示为数字示波器的方框图。

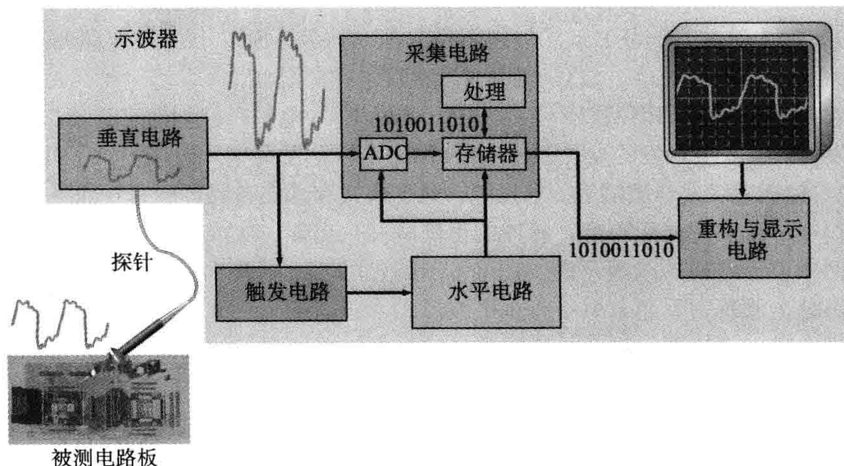


图 8-63　数字示波器框图

8.9.3　示波器控制

典型双通道示波器前面板视图如图 8-64 所示。虽然根据型号和制造商各种仪器会有所不同，但大多数都有一些共同特征。

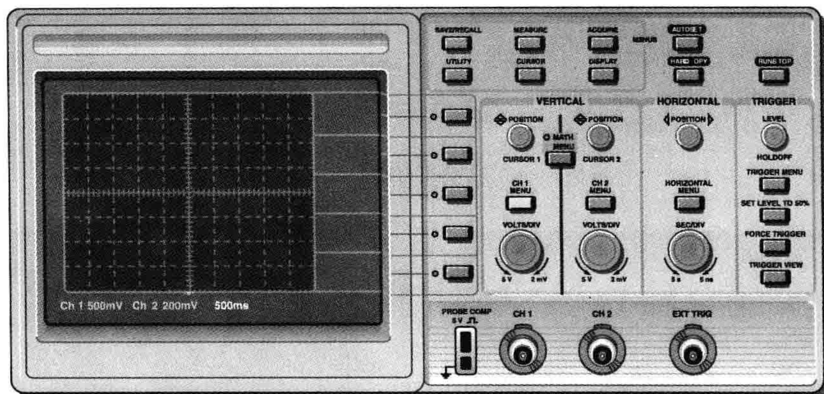


图 8-64　典型双通道示波器，屏幕下方的数字指示垂直（电压）和水平（时间）尺度每格对应值，可通过示波器的垂直和水平控制来调节

例如，两个垂直通道包含 Position（位置）控制、通道菜单按钮和 VOLTS/DIV 控制（垂直衰减），水平部分包含 SEC/DIV 控制（扫描控制）。

下面讨论一些主要的控制，具体详细的控制请参考所使用示波器的用户手册。

垂直控制　在图 8-64 所示的示波器面板的 VERTICAL（垂直）部分，对两个通道（CH1 和 CH2）都有相同的控制。POSITION（位置）控制用于将屏幕显示的波形上下移动；通道菜单按钮（CH1 MENU 和 CH2 MENU）提供了几个选择项（出现在屏幕上），如耦合方式（AC、DC 或接地）和 VOLTS/DIV 的粗调和细调；VOLTS/DIV（伏/格）控制设置屏幕上垂直的每一格代表的电压值，每个通道的 VOLTS/DIV 设置显示在屏幕的底部；MATH MENU

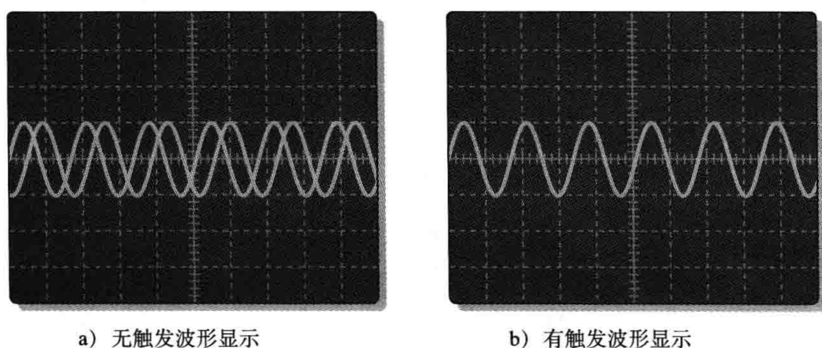
（数学菜单）按钮可以选择对输入波形进行运算，如信号的减法和加法等。

水平控制 面板的HORIZONTAL水平部分同时对两个通道控制。POSITION控制用于将屏幕显示的波形左右移动；HORIZONTAL MENU（水平菜单）按钮提供了几个选择项目（出现在屏幕上），如主时基、部分波形扩展视图及其他参数等；SEC/DIV（秒/格）控制调节屏幕上水平的每一格代表的时间值，SEC/DIV的设置显示在屏幕底部。

触发控制 在面板的TRIGGER（触发）区，LEVEL（电平）控制确定起动扫描显示输入波形所需的触发波形上发生触发的点；TRIGGER MENU（触发菜单）按钮提供了几个选择项（出现在屏幕上），包括边缘或斜坡触发、触发源、触发模式和其他参数，还有外部触发信号输入。

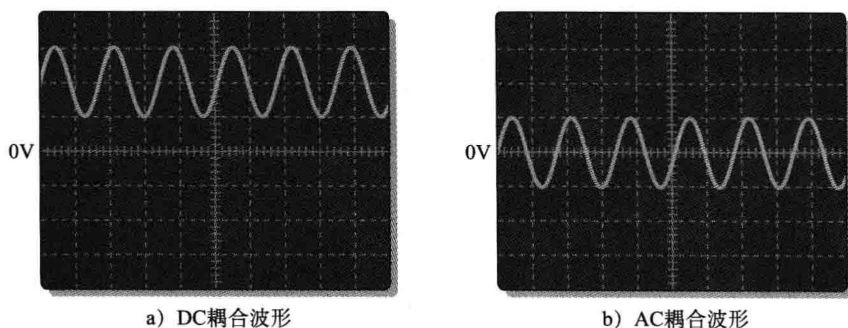
触发使得在屏幕上的波形稳定，脉冲的正确触发只出现一次或随机出现。此外，触发还可以让你观察两个波形之间的时间延迟。图8-65比较了有触发和无触发信号，没有触发信号会导致波形在屏幕上漂移，看起来似乎有多个波形。

将信号耦合进入示波器 耦合是将被测量信号电压连接到示波器的方法，可从垂直菜单选择DC和AC耦合模式。DC耦合允许要显示的波形包含直流分量；AC耦合隔离了信号的直流分量，所以看到的波形中心在0V；接地模式将通道的输入接地，屏幕上看到的是0V参考。图8-66显示了一个含直流分量正弦波的波形，分别使用DC和AC耦合。



a）无触发波形显示　　b）有触发波形显示

图8-65 无触发和有触发示波器比较



a）DC耦合波形　　b）AC耦合波形

图8-66 含有直流分量的同一波形显示

如图8-67所示，电压探头用于将信号连接到示波器。由于负载效应，所有仪器往往会影响到被测电路，因此大多数示波器探头提供了一个衰减网络使负载效应降至最低。使测量信号衰减为原来1/10的探头称为×10（乘10）探头，无衰减探头称为×1（乘1）探头。大多数示波器自动调整所使用探头衰减的校准。大多数情况下测量应使用×10探头。但如测量非常小的信号，最好选择×1探头。

探头有一个调整用于调节示波器的输入补偿电容。多数示波器提供探头输出补偿的校准方波。进行测量之前应该确保探头得到适当的补偿，以消除失真。典型情况是在探头上有一个螺钉或其他装置来调整探头的补偿。图 8-68 显示了示波器在三种探头条件下的波形：适当补偿、欠补偿、过补偿。如果波形出现过或欠补偿，应调节探头直到显示适当补偿的方波。

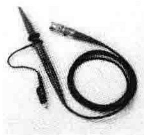
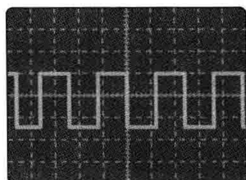
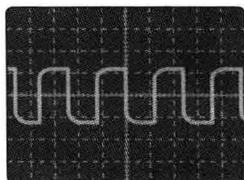


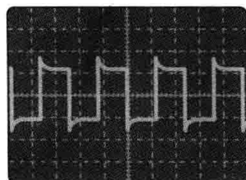
图 8-67　示波器电压探头
Copyright ©Tektronix，
图片经许可转载



适当补偿



欠补偿



过补偿

图 8-68　探头补偿条件

【例 8-17】　从数字示波器显示以及伏/格和秒/格设置（显示在屏幕下方），确定图 8-69 中各个正弦波的峰峰值和周期，正弦波在屏幕上垂直居中。

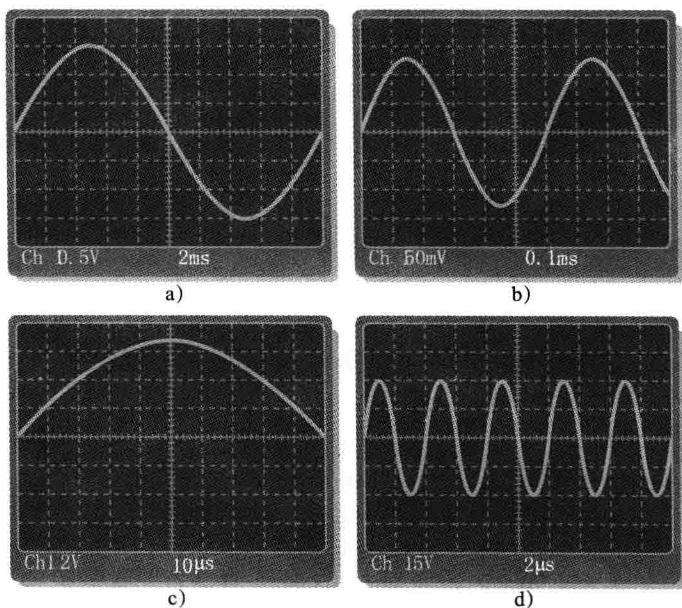


图　8-69

解：从图 8-69a 的垂直刻度读出

$$V_{pp} = 6\ 格 \times 0.5\text{V}/\ 格 = 3.0\text{V}$$

从水平刻度（一个周期占十格）得到

$$T = 10\ 格 \times 2\text{ms}/\ 格 = 20\text{ms}$$

从图 8-69b 的垂直刻度读出

$$V_{pp} = 5\ 格 \times 50\text{mV}/\ 格 = 250\text{mV}$$

从水平刻度（一个周期占六格）得到

$$T = 6\ 格 \times 0.1\text{ms}/\ 格 = 600\mu\text{s}$$

从图8-69c的垂直刻度读出

$$V_{pp} = 6.8 格 \times 2V/格 = 13.6V$$

从水平刻度（半个周期占十格）得到

$$T = 20 格 \times 10\mu s/格 = 200\mu s$$

从图8-69d的垂直刻度读出

$$V_{pp} = 4 格 \times 5V/格 = 20V$$

从水平刻度（一个周期占两格）得到

$$T = 2 格 \times 2\mu s/格 = 4\mu s$$

相关问题：试确定图8-69所示波形的有效值与频率。

本节测试题

1. 试问数字示波器与模拟示波器的主要区别是什么？
2. 示波器屏幕上是垂直还是水平读取电压？
3. 试问示波器上VOLTS/DIV（伏/格）控制什么？
4. 试问示波器上SEC/DIV（秒/格）控制什么？
5. 试问什么时候应该使用×10探头测量电压？

8.10　信号源

8.1节介绍了函数发生器，本节将更深入地讨论函数发生器和其他常用于测试电路的信号源。几乎所有电子工作台都要用到函数发生器，其他信号源包括专用信号发生器和数字模式发生器。

学习完本节内容，应该能够

- 描述信号源的类型，解释典型控制的用途；
- 讨论信号源的类型及其应用；
- 描述信号源的重要指标；
- 描述典型函数信号发生器的功能选择、频率/幅度调节控制、直流偏移/占空比控制。

8.10.1　信号源的类型

信号可以由各种小功率的电子仪器产生，覆盖了从基本正弦波振荡器到具有波形选择的信号发生器，波形包括正弦波、斜坡、脉冲甚至输出任意波形的特殊信号发生器。除了低端仪器之外，信号发生器的输出频率和振幅都要进行校准并在一定范围内可调。产生测试波形的仪器一般都归类为低频、射频和微波信号发生器。传统上，低频发生器输出频率范围从直流到约1MHz，一般射频信号源输出频率覆盖100kHz～1GHz，而微波信号源则输出在1GHz以上频率。市场上各种信号发生器之间的区别模糊这些传统的范围，根据信号波形的变化频率范围有所不同。

一些重要类型的信号源有函数发生器、任意函数发生器（AFG）、信号发生器（有时简称为射频发生器）、扫频振荡器（或扫频仪）、脉冲发生器和数字模式发生器（DPG）。

函数发生器　函数发生器使用一个自由运行的振荡器，在一台仪器上可产生正弦波、方波、三角波供选择。函数发生器还可以产生脉冲、锯齿波和其他波形。

任意函数发生器（AFG）　任意函数发生器是最通用的信号发生器，实质是数字频率合成器，允许用户从数学公式、捕获的波形或仿真软件创建自定义的波形。AFG使用控制器和数-模转换器（DAC）创建模拟波形。

信号发生器　信号发生器产生高频正弦波和调制的正弦波。信号发生器种类繁多，频率从直流到微波，许多使用频率合成器生成精确的波形。频率合成器从固定基准振荡器以数字方式生成波形。

扫频振荡器　扫频振荡器产生一个在两选定频率之间循环变化的变频正弦波输出，允许用户直接在频域观察信号，某些型号可产生对数或其他非线性扫描输出。

脉冲发生器　脉冲发生器是一种专门仪器，生成宽频率范围快速上升时间脉冲而且占空比可调，常常输出特定的逻辑电平。多数脉冲发生器允许用户控制各种脉冲参数，如幅度、上升时间、偏移量、触发和极性。此外，有些仪器还能生产脉冲对和序列。

数字模式发生器（DPG）　数字模式发生器产生用于数字设备测试的数字序列，某些 DPG 可以生成一系列的标准测试模式用做性能检查。

系统注释：扫频测量

很多时候，需要测试系统的频率响应，扫频振荡器是一种输出可设定的信号发生器，根据被测系统设置扫频范围。例如，雷达发射机可能有多个波段，需要一起工作以产生所希望的输出，频率落在微波区域，所以该信号发生器是专门的微波振荡器。

扫频振荡器能产生一个小的高频信号用于调谐。系统实时调谐时，将响应转换成可在示波器上观察的信号。

8.10.2　信号发生器的指标

信号发生器最重要的指标是模式、频率范围、频谱纯度、振幅范围、调制和输出阻抗。下面讨论这些参数。

模式　模式是信号发生器能够输出的信号类型指标。专用信号发生器可能只有一种模式，如正弦波。函数发生器将有几个可供选择的模式（波形类型），通常为正弦波、方波、三角波、正负脉冲。正负斜坡。脉冲的开/关时间——占空比也是可调的。

频率范围　频率范围指仪器达到指定性能的频率跨度，精度和分辨率限制通常也随频率范围指标给定。精度指标取决于内部振荡器的精度以及波段控制的类型（机械的或数字的）。如果内部振荡器不准确，采用精确的数字控制就没有价值；若内部振荡器准确，而采用不精确的机械波段控制也是没有意义的。

频谱纯度　纯正弦波在频域只有单一基频线，信号发生器的一类失真称为相位噪声，它使基频线变宽，意味着信号不再是单纯的正弦波。另一种失真称为谐波失真，意味着输出中存在基频的倍数频率分流。这些失真和其他噪声可能会给某些系统测试带来问题，特别是在检验通信设备时，即使设备工作正常，失真的信号发生器将使测试电路看上去失常。

幅度范围　这个指标给出输出电压的振幅范围或输送给指定负载的最大和最小功率。除了交流电压的振幅范围之外，输出指标还包括直流偏移量范围以及精度、分辨率和整个频率范围内的输出平坦性。相关的调节是直流偏移量，直流偏移量的范围是可叠加到输出的正或负直流电压，典型直流偏移量是一个可高达约 10V 的变量。

调制　调制是用含信息的信号去改变另一信号特征的过程，如振幅、频率或脉冲宽度，以便包含在第一个信号中的信息也包含在第二个信号中。带调制的信号发生器允许用户用低频波形（称为调制信号）去改变高频波形（在通信系统中称为载波）。调制信号可以由外部电源提供或在信号发生器内部产生。典型的调制信号有正弦波、方波、三角波或锯齿波。高频信号可调制的参数是振幅、频率或相位。不同的调制方法用于不同通信系统性能的测试。

输出阻抗　不管内部电路多么复杂，信号发生器都可建模为由一个电阻串联电压源构成的戴维南电路。输出阻抗等效于和理想电压源串联的电阻，信号发生器通常在输出端子上标记输

出阻抗，典型值有50Ω、75Ω或600Ω。记住，将负载连接到输出电阻有限的电源会改变信号发生器输出电压的振幅。

输出电压振幅的变化会对测量产生影响，如果不考虑这种影响可能使测量结果毫无意义。例如，在不考虑信号发生器影响的情况下，测量电路的频率响应，要求输入振幅必须保持恒定值，频率变化时对被测电路的输出进行监测，频率的每次变化都使放大器的输入阻抗改变，导致不同的负载效应。为防止输入负载响应影响输出，每次新频率测试时都应将信号发生器的振幅调整为相同的值。

8.10.3 波形模式

根据不同的复杂性，波形发生器可以有一至数个波形模式可供选择。常用的波形模式如下：

连续 输出是特定频率、振幅和偏移量的稳定波形，这是信号发生器的基本输出。

触发 由内部或外部（用户提供）触发来起动输出，触发信号可以由外部设备产生、手动按钮或通过控制总线发送。

脉串 与触发模式相同，但每次输出被编程为特定周期数目的脉冲串，利用一个独立振荡器可以重复设置，脉冲串可由手动或可编程仪器中的命令触发。

门控 输出只在外部门信号的持续期间被使能。

扫频 输出频率以某种预设方式变化，扫频方式可以是触发式或编程式（起始-结束频率）、线性或对数。

调制 输出被内部或外部波形调制，调制输出用于通信系统测试。

8.10.4 基本函数发生器

函数发生器的特征是能产生各种波形，包括正弦波、方波和三角波，也可能包括脉冲和斜坡（锯齿）波。正弦波和方波通常用于电路的一般性测试（例如放大器），占空比偏离50%的脉冲便于数字测试，因为脉冲反转后外观不同，所以容易分辨脉冲是否反转；而方波反转后看起来仍然像方波。图8-70所示的多功能函数发生器为Agilent（安捷伦）33220A，该信号发生器比基本信号发生器包括更多功能，如将波形保存在存储器的能力。要在Agilent 33220A上建立一个标准波形，可按图8-70中所示设置控制。



1）按下电源开关开机。
2）选择功能开关设置波形种类（正弦、脉冲等），这时功能键亮起。
3）用图形模式立即观看所有设置。
4）利用按钮调节功能（频率、幅度等）。
5）用键盘或圆形旋钮调整所选功能。

图8-70 Agilent 33220A函数发生器

显示器是函数发生器的一个选项，有些型号的函数发生器不含有显示器，用户使用示波器来检验发生器信号。另外有些函数发生器，如Agilent 33220A，含有数字读出功能，能显示精确的频率（或周期）、偏移量等，并直观显示波形模式；还有一个图形模式显示所选波形，使用软键菜单调节波形参数（频率、周期、上升时间等）。

函数发生器常具有专为数字系统测试设计的输出，数字系统的特征是只有两个电压电平，

称为高电平和低电平，由待测试的逻辑类型决定。脉冲输出可由生产商设置或由用户根据信号发生器自行设置。数字系统使用高速信号，上升时间是重要指标。该指标是信号输出电平从 10%上升到 90%所需的时间。

函数发生器的另一个可选项是通过计算机或控制器控制输出，这在自动测试系统中特别有用，该系统可根据测试的特定需求来调整输出。

【例 8-18】 假设函数发生器输出信号如图 8-71 中的示波器所示。示波器控制设置如图 8-71 所示。试确定函数发生器的波形的类型、频率设置和峰峰值幅度。通常情况下，峰峰值用示波器可简单测量，顾名思义，测量波形之间最大偏移。

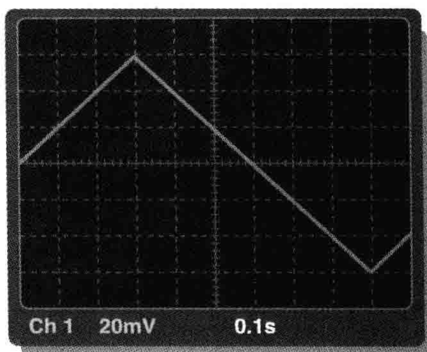


图 8-71 横轴表示 0V

解： 所选波形为三角波。周期是

$$T = 2 \times 6\ 格 \times 0.1\mu s/格 = 1.2\mu s$$

频率设置为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1.2\mu s} = 0.833\text{MHz}$$

峰峰值幅度为

$$V_{pp} = 6\ 格 \times 20\text{mV}/格 = 0.12\text{V}$$

相关问题：若三角波形从 0 V 移至 1.20 V，试问直流偏移设置是多少？（没有直流偏移，波形中心在 0V。）

本节测试题

1. 试问任意函数发生器能够产生什么类型的信号？
2. 什么是扫频振荡器？
3. 为什么对于函数发生器来说频谱纯度很重要？
4. 什么是调制？
5. 函数发生器的脉串模式是什么？

本章小结

- 正弦波是时变的周期性波形。
- 正弦波是交流电压和交流电压的基本类型。
- 电源电压的极性改变，交流电流方向也改变。
- 交变正弦波一个周期包含一个正交变期和一个负交变期。
- 正弦波半个周期的平均值是 0.637 乘以峰值，整个周期的平均值为零。
- 正弦波的一个周期为 360°或 2π 弧度，半个周期为 180°或 π 弧度，四分之一周期为 90°或 π/2 弧度。
- 相位角是两个正弦波或正弦波与参考正弦波之间的角度（或弧度）之差。
- 相量的角度位置表示正弦波的角度，而相量的长度表示正弦波的振幅。
- 应用欧姆定律与基尔霍夫定律时电压和电流必须使用一致的单位。
- 交流电阻电路中功率计算用有效值电压和有效值电流。
- 当磁场与导体之间存在相对运动时交流发电机产生电源。
- 多数交流发电机从定子输出，转子提供运动的磁场。
- 电动机的两个主要类型是感应电动机和同步电动机。
- 感应电动机的转子响应定子的旋转磁场而转动。
- 同步电动机以与定子磁场同步的恒定转速运行。
- 脉冲由从基线电平到幅值电平的转变及随后的从幅值电平到基线电平的转变构成。
- 三角波和锯齿波由正向斜坡和负向斜坡构成。
- 谐波频率是非正弦波形重复率（或基频）的奇数或偶数倍。

● 正弦波的转换小结如表8-2所示。

表 8-2 正弦波的转换

原始值	转换值	乘数
峰值	有效值	0.707
峰值	峰峰值	2
峰值	平均值	0.637
有效值	峰值	1.414
峰峰值	峰值	0.5
平均值	峰值	1.57

● 信号源包括函数发生器和一些专门的仪器。

● 信号发生器的关键指标包括模式、频率范围、频谱纯度、幅度范围、调制和输出阻抗。

关键术语

交流发电机（Alternator） 一种交流发生器，将机械能转换成电能。

振幅（Amplitude） 电压或电流的最大值。

周期（Cycle） 周期性波形的一次重复。

度（Degree） 角度的度量单位，对应于旋转一周的1/360。

占空比（Duty cycle） 脉冲波形的重要特征，指脉冲存在期占整个周期的百分比，或脉冲宽度与周期的比值，表示成分数或百分数。

下降时间（Fall time，t_f） 脉冲从其幅度的90%下降到10%所需的时间。

频率（Frequency，f） 周期函数变化速率的度量，对应于在1s内的周期数。频率的单位是赫兹（Hz）。

函数发生器（Function generator） 产生多种波形的仪器。

谐波（Harmonics） 包含在复合波形中的频率，是脉冲重复频率（基频）的整数倍。

赫兹（Hertz，Hz） 频率的单位，一赫兹等于每秒一个周期。

感应电动机（Induction motor） 通过变压器作用在转子上实现励磁的交流电动机。

瞬时值（Instantaneous value） 在给定时间瞬间的电压或电流值。

调制（Modulation） 用含信息信号去改变另一信号特征的过程，如振幅、频率或脉冲宽度，从而使包含在第一个信号中的信息也包含在第二个信号中。

振荡器（Oscillator） 一种仅有直流电源电压输入而在输出端产生周期性波形的电子电路。

示波器（Oscilloscope） 一种在屏幕上显示信号波形的测量仪器。

峰峰值（Peak-to-peak value） 电压或电流波形上从最小点到最大点测量的值。

峰值（Peak value） 电压或电流波形上正的最大值或负的最大值。

周期（Period，T） 周期性波形一个完整周期的时间间隔[㊀]

周期性（Periodic） 以固定时间间隔重复的特征。

相位（Phase） 随时间变化的波形相对于参考的相对角位移。

脉冲（Pulse） 一种由两个幅度相等方向相反阶跃构成的电压或电流波形，两个阶跃之间有一段时间间隔。

脉冲宽度（Pulse width，t_W） 理想脉冲两个反向阶跃之间的时间间隔，对于非理想脉冲则为前后沿50%点之间的时间间隔。

弧度（Radian） 角度的度量单位，一个完整圆周为2π弧度，一弧度等于57.3°。

斜坡（Ramp） 一种具有随时间线性增大或减小的电压或电流波形特征。

上升时间（Rise time，t_r） 脉冲从其幅度的10%上升到90%所需的时间。

有效值（rms value，rms值） 表明其热效应的正弦电压值，也称为有效值，等于峰值乘以0.707，rms代表方均根。

正弦波（Sine wave） 一种服从公式 $v = A\sin\theta$ 定义的周期性正弦模式波形。

转差（Slip） 感应电动机定子磁场的同步转速与转子转速之间的差。

鼠笼（Squirrel cage） 感应电动机转子内的铝框，用做形成旋转电流的电导体。

同步电动机（Synchronous motor） 一种交流电动机，其转子以和定子旋转磁场同样的转速运转。

波形（Waveform） 电压或电流变化的模式，表现物理量如何随时间变化。

㊀ 周期长度也简称为周期。——译者注

关键公式

公式	说明
(8-1) $f=\frac{1}{T}$	频率
(8-2) $T=\frac{1}{f}$	周期
(8-3) $V_{pp}=2V_{p}$	峰峰值电压（正弦波）
(8-4) $I_{pp}=2I_{p}$	峰峰值电流（正弦波）
(8-5) $V_{rms}=0.707V_{p}$	方均根电压（正弦波）
(8-6) $I_{rms}=0.707I_{p}$	方均根电流（正弦波）
(8-7) $V_{p}=1.414V_{rms}$	峰值电压（正弦波）
(8-8) $I_{p}=1.414I_{rms}$	峰值电流（正弦波）
(8-9) $V_{pp}=2.828V_{rms}$	峰峰值电压（正弦波）
(8-10) $I_{pp}=2.828I_{rms}$	峰峰值电流（正弦波）
(8-11) $V_{avg}=0.637V_{p}$	半周期平均电压（正弦波）
(8-12) $I_{avg}=0.637I_{p}$	半周期平均电流（正弦波）
(8-13) $弧度=\left(\frac{\pi\ 弧度}{180^{\circ}}\right)\times 度$	度转换为弧度
(8-14) $度=\left(\frac{180^{\circ}}{\pi\ 弧度}\right)\times 弧度$	弧度转换为度
(8-15) $y=A\sin\theta$	正弦波的一般公式
(8-16) $v=V_{p}\sin\theta$	正弦电压
(8-17) $i=I_{p}\sin\theta$	正弦电流
(8-18) $y=A\sin(\theta-\phi)$	超前正弦波
(8-19) $y=A\sin(\theta+\phi)$	滞后正弦波
(8-20) $f=\frac{Ns}{120}$	交流发电机输出频率
(8-21) $百分比占空比=\left(\frac{t_{W}}{T}\right)\times 100\%$	占空比
(8-22) $V_{avg}=基线+占空比\times 幅度$	脉冲波形的平均电压

是非测验题

1. 60Hz 正弦波的周期是 16.7ms。
2. 正弦波的有效值和平均值相同。
3. 峰值为 10V 的正弦波与 10V 直流电源具有相同的热效应。
4. 正弦波的峰值与其振幅相同。
5. 360°的弧度数为 2π。
6. 三相电力系统中各相相位分别相隔 60°。
7. 励磁机的用途是给交流发电机提供直流转子电流。
8. 自激式交流发电机经过集电环从转子输出电流。
9. 感应电动机的维护问题是更换电刷。
10. 同步电动机用于需要恒定速度的场合。
11. 钳形表能适用于测量直流。
12. 在自激式交流发电机中二极管阵列的用途是将直流转换为交流。

自测题

1. 交流电流与直流电流的区别是
   (a) 交流数值变化，直流数值不变
   (b) 交流方向变化，直流方向不变
   (c) (a) 和 (b) 都正确
   (d) (a) 和 (b) 都不正确
2. 每个周期中，正弦波达到峰值
   (a) 一次　　(b) 两次
   (c) 四次　　(d) 次数取决于频率

3. 频率为 12kHz 的正弦波比下列（ ）频率的正弦波变化快
   (a) 20kHz　(b) 15 000Hz
   (c) 10 000Hz　(d) 1.25MHz
4. 周期为 2ms 的正弦波比下列（ ）周期的正弦波变化快
   (a) 1ms　(b) 0.0025s
   (c) 1.5ms　(d) 1000μs
5. 频率为 60Hz 的正弦波在 10s 内经过了
   (a) 6 个周期　(b) 10 个周期
   (c) 1/16 周期　(d) 600 个周期
6. 如果正弦波峰值为 10V，则峰峰值是
   (a) 20V　(b) 5V
   (c) 100V　(d) 以上都不是
7. 如果正弦波的峰值是 20V，则有效值是
   (a) 14.14V　(b) 6.37V
   (c) 7.07V　(d) 0.707V
8. 峰值为 10V 的正弦波一个完整周期的平均值是
   (a) 0V　(b) 6.37V
   (c) 7.07V　(d) 5V
9. 峰值为 20V 的正弦波半个周期的平均值是
   (a) 0V　(b) 6.37V
   (c) 12.74V　(d) 14.14V
10. 一个正弦波的正向过零点在 10°，另一个正弦波的正向过零点在 45°，两个正弦波的相位角是
    (a) 55°　(b) 35°
    (c) 0°　(d) 以上都不是
11. 峰值为 15A 的正弦波，在距离其正向过零点 32°时的瞬时值为
    (a) 7.95A　(b) 7.5A
    (c) 2.13A　(d) 7.95V
12. 若流过 10kΩ 电阻的电流有效值为 5mA，则电阻两端的电压有效值将降为
    (a) 70.7V　(b) 7.07V
    (c) 5V　(d) 50V
13. 两个串联电阻接在交流电源上，如果一个电阻两端电压有效值为 6.5V，另一个两端电压有效值为 3.2V 电压，则电源电压峰值为
    (a) 9.7V　(b) 9.19V
    (c) 13.72V　(d) 4.53V
14. 三相感应电动机的优点是
    (a) 对于任意负载保持恒定转速
    (b) 不需要起动绕组
    (c) 具有绕线转子
    (d) (a)、(b) 和 (c)
15. 电动机定子磁场的同步转速与转子转速之差称为
    (a) 差速　(b) 加载
    (c) 滞后　(d) 转差
16. 10kHz 脉冲波形由 10μs 宽的脉冲构成，则占空比为
    (a) 100%　(b) 10%
    (c) 1%　(d) 无法确定
17. 方波的占空比
    (a) 随频率变化
    (b) 随脉冲宽度变化
    (c) (a) 和 (b)
    (d) 等于 50%
18. 在起止频率之间改变输出的波形模式称为
    (a) 触发　(b) 脉串
    (c) 扫描　(d) 调制

故障排除：征兆与原因

参考图 8-72，给每一组征兆确定原因。

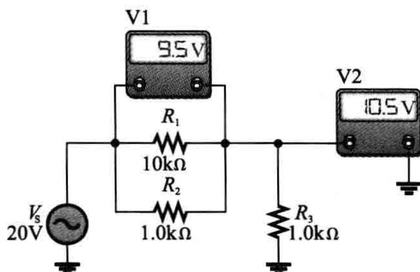


图 8-72　交流电表指示电路的正确读数

1. 征兆：电压表 1 读数为 0V，电压表 2 读数为 20V。
   原因：
   (a) R_1开路　(b) R_2开路
   (c) R_3开路
2. 征兆：电压表 1 读数为 20V，电压表 2 读数为 0V。
   原因：
   (a) R_1开路　(b) R_2短路
   (c) R_3短路
3. 征兆：电压表 1 读数为 18.2V，电压表 2 读数

为 1.8V。

原因：

(a) R_1开路　　(b) R_2开路

(c) R_1短路

4. 征兆：两个电压表读数均为 10V。

原因：

(a) R_1开路　　(b) R_1短路

(c) R_2开路

5. 征兆：电压表 1 读数为 16.7V，电压表 2 读数为 3.3V。

原因：

(a) R_1短路

(b) R_2用 10kΩ 替换了 1.0kΩ

(c) R_3用 10kΩ 替换了 1.0kΩ

习题

基本习题

8.1 节

1. 对应下列周期计算频率：

(a) 1s　(b) 0.2s　(c) 50ms

(d) 1ms　(e) 500μs　(f) 10μs

2. 对应下列频率计算周期：

(a) 1Hz　(b) 60Hz　(c) 500Hz

(d) 1kHz　(e) 200kHz　(f) 5MHz

3. 某正弦波在 10μs 中经历了 5 个周期，试问其周期是多少？

4. 正弦波频率为 50Hz，试问 10ms 内经历多少个周期？

5. 试问 10kHz 正弦波经历 100 个周期需要多长时间？

8.2 节

6. 正弦波峰值为 12V，试确定下列电压值：

(a) 有效值　(b) 峰峰值

(c) 半周期平均值

7. 正弦电流的有效值为 5mA，试确定下列电流值：

(a) 峰值　(b) 半周期平均值

(c) 峰峰值

8. 对图 8-73 的正弦波求峰值、峰峰值、有效值和半周期平均值。

9. 如图 8-73 所示水平每格为 1ms，求在下列时刻的电压瞬时值：

(a) 1ms　(b) 2ms

(c) 4ms　(d) 7ms

8.3 节

10. 在图 8-73 中，在下列角度时的瞬时电压是多少？

(a) 45°　(b) 90°　(c) 180°

11. 正弦波 A 的正过零点在参考点后 30°，正弦波 B 的正过零点在同一个参考点后 45°，试确定两个信号之间的相位角，哪个信号超前？

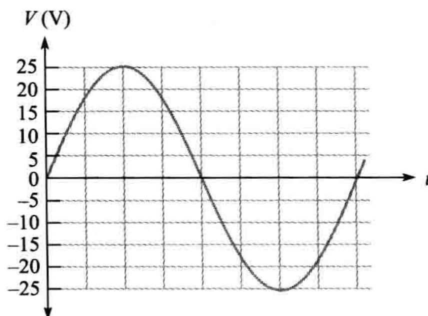


图 8-73

12. 一个正弦波的正峰值在 75°处，另一个正弦波的正峰值在 100°处，试问各个正弦波相对于 0°参考的相位移是多少？两个信号之间的相位角是什么？

13. 画出如下两个正弦波：正弦波 A 是参考，正弦波 B 比 A 滞后 90°，两正弦波振幅相同。

14. 将下列角度值从度转换为弧度：

(a) 30°　(b) 45°　(c) 78°

(d) 135°　(e) 200°　(f) 300°

15. 将下列角度值从弧度转换为度：

(a) π/8　(b) π/3　(c) π/2

(d) 3π/5　(e) 6π/5　(f) 1.8π

8.4 节

16. 某正弦波的正过零点在 0°，有效值为 20V，计算下列角度时的瞬时值：

(a) 15°　(b) 33°　(c) 50°

(d) 110°　(e) 70°　(f) 145°

(g) 250°　(h) 325°

17. 对于特殊的 0°参考正弦电流，峰值为 100mA，求下列各点的瞬时值：

(a) 35°　(b) 95°　(c) 190°

(d) 215°　(e) 275°　(f) 360°

18. 对于 0°参考正弦波的有效值为 6.37V，求下列各点的瞬时值：

(a) π/8 弧度 (b) π/4 弧度 (c) π/2 弧度
(d) 3π/4 弧度 (e) π 弧度 (f) 3π/2 弧度
(g) 2π 弧度

19. 正弦波 A 滞后正弦波 B 30°，两者峰值均为15V，正弦波 A 是正过零点在0°的参考，求正弦波 B 在30°、45°、90°、180°、200°和300°时的瞬时值。

20. 当正弦波 A 滞后正弦波 B 30°时，重复习题19。

8.5 节

21. 正弦电压加在图8-74所示的电阻电路中，求下列各量：
(a) I_{rms} (b) I_{avg} (c) I_p
(d) I_{pp} (e) 正峰值点的 i

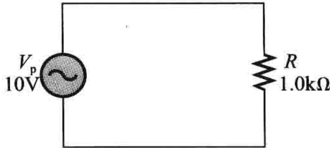


图 8-74

22. 求图8-75中 R_1 和 R_2 两端电压的半周期平均值，图中所示值均为有效值。

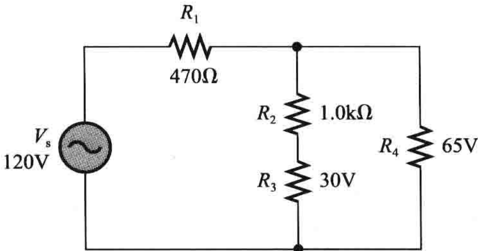


图 8-75

23. 求图8-76中 R_3 两端电压的有效值。

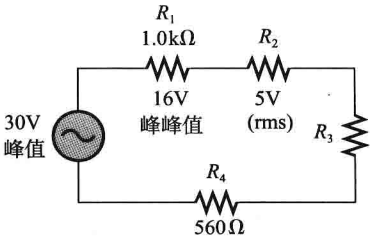


图 8-76

24. 一个有效值为10.6V的正弦波叠加在24V直流电平之上，求合成波形的最大值和最小值。

25. 正弦波的有效值为3V，为了使复合波形不交变（没有负值），试问应叠加多大的直流电压？

26. 峰值为6V的正弦波叠加在8V直流电压上，如果直流电压降低到5V，试问正弦波负向会有多大？

8.6 节

27. 单相发电机转速为250r/s，试问简单两磁极转子上导线环路感应的输出电压频率是多少？

28. 某四磁极发电机转速为3600r/m，试问该发电机产生的电压频率是多少？

29. 若要四磁极发电机产生400Hz正弦电压，试问必须以什么转速运行？

30. 飞机上交流发动机的公共频率为400Hz，如果转速为3000r/m，试问发电机有多少磁极？

8.7 节

31. 试问单相感应电动机和三相感应电动机的主要区别是什么？

32. 如果励磁线圈没有活动部件，试解释三相电动机的磁场如何旋转。

8.8 节

33. 从图8-77的波形确定 t_r、t_f、t_W 和幅度。

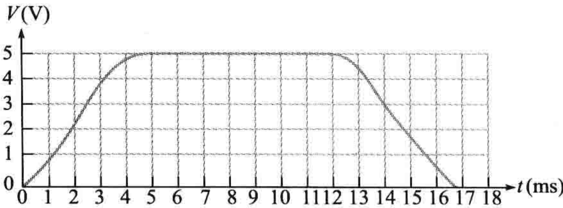
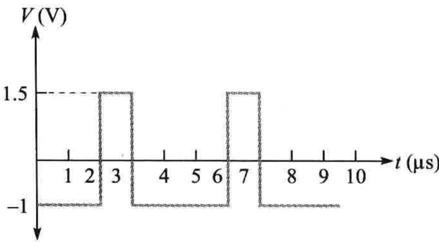


图 8-77

34. 求图8-78中各个波形的占空比。



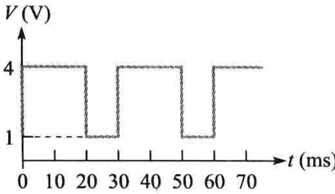


图 8-78

35. 求图 8-78 中各正向脉冲的平均值。
36. 试问图 8-78 中各个波形的频率是多少?
37. 试问图 8-78 中各个锯齿波的频率是多少?

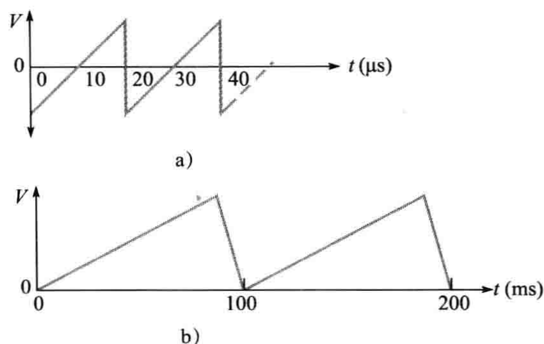


图 8-79

38. 方波的周期为 40μs，请列出前六个奇次谐波。
39. 习题 38 所述的方波基频是多少?

8.9 节

40. 试确定图 8-80 中屏幕显示正弦波的峰值和周期，水平轴为 0V。
41. 试确定图 8-80 中屏幕显示的正弦波的有效值和频率。

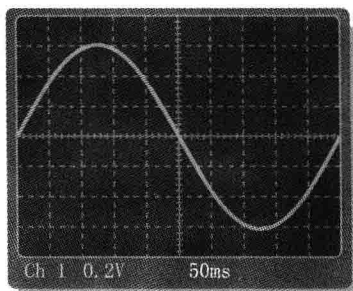


图 8-80

42. 试确定图 8-81 中屏幕显示的正弦波的有效值和频率，水平轴为 0V。

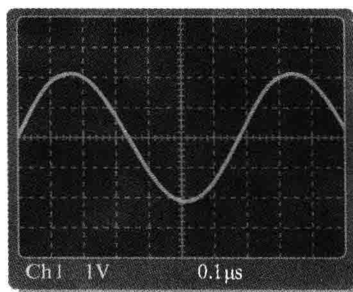


图 8-81

43. 求图 8-82 中屏幕显示的脉冲波形的幅度、脉冲宽度和占空比，水平轴为 0V。

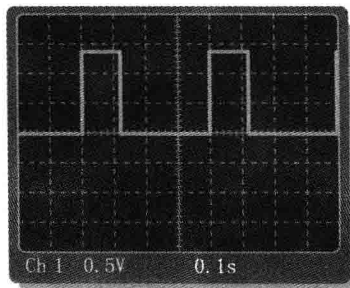


图 8-82

8.10 节

44. 为什么频谱纯度对于正弦信号发生器是重要的?
45. 什么是调制信号? 它是怎样加到模拟信号发生器的?
46. 假设用不同的频率测试电路的响应，为什么每次改变信号发生器频率时都要检查信号电平?
47. 信号发生器脉串模式和门控模式的主要区别是什么?

高级习题

48. 某正弦波频率为 2.2kHz，有效值为 25V，假设给定周期起点（过零点）在 $t=0s$，试问从 0.12ms 到 0.2ms 电压怎样变化?
49. 图 8-83 显示一个正弦电压源与直流电源串联，两个电压有效叠加，试画出 R_L 两端的总电压，求流过 R_L 的最大电流和 R_L 两端的平均电压。

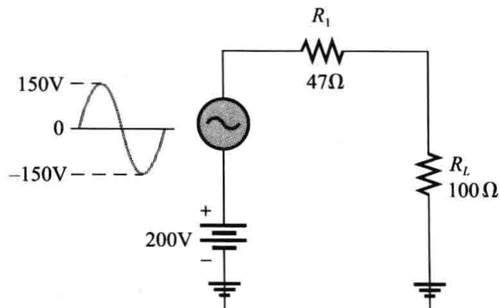


图 8-83

50. 图 8-84 所示的非正弦波形称为阶梯波，求该波形的平均值。

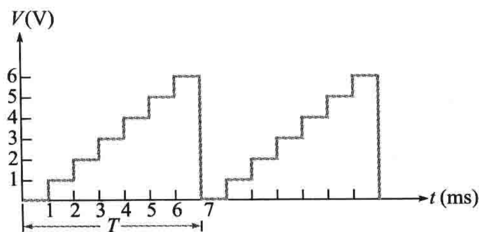


图 8-84

51. 参照图 8-85 所示的示波器屏幕，试问
   (a) 显示了多少个周期？

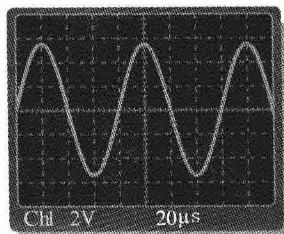


图 8-85

   (b) 正弦波的有效值是多少？
   (c) 正弦波的频率是多少？
52. 如果将 VOLTS/DIV（伏/格）控制调为 5V，请在图 8-85 所示的示波器屏幕网格上精确地绘制将要显示的正弦波波形。
53. 如果将 SEC/DIV（秒/格）控制调为 20μs，请在图 8-85 所示的示波器屏幕网格上精确地绘制将要显示的正弦波波形。
54. 根据图 8-86 中的仪器设置、示波器显示和电路板，确定输入信号和输出信号的频率与峰值。通道 1 的波形已显示，请按指定设置绘制通道 2 的波形。其中，电阻 R_1 和 R_2 的色环颜色分别为：绿、蓝、棕、金；电阻 R_3 和 R_4 的色环颜色分别为：黄、紫、棕、金。
55. 检查图 8-87 所示电路板和示波器，确定未知输入信号的峰值和频率。其中，电阻 R_1、R_3、R_4 的色环颜色分别为：棕、黑、红、金；电阻 R_2 的色环颜色分别为红、红、红、金。

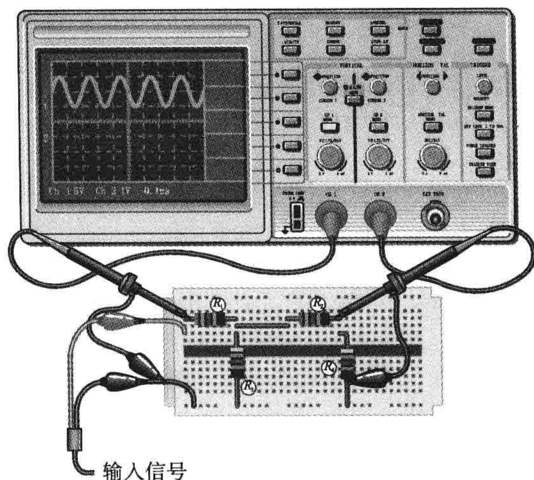


图 8-86

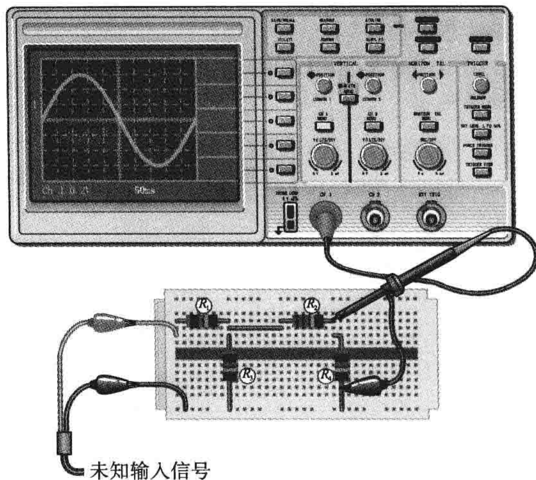


图 8-87

Multisim 仿真故障排除习题

56. 打开文件 P08-56，用示波器测量正弦波电压的峰值和周期。
57. 打开文件 P08-57，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
58. 打开文件 P08-58，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
59. 打开文件 P08-59，用示波器测量脉冲波形的幅度和周期。
60. 打开文件 P08-60，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。

各节测试题答案

8.1 节

1. 一个周期从过零点开始通过正峰值，然后经过零点到负峰值，再返回过零点。
2. 正弦波在过零点改变极性。
3. 正弦波一个周期内有两个最大点（峰值）。
4. 从一个过零点到下一个对应过零点或从一个峰

值到下一个对应峰值测量周期。
5. 频率是一秒钟内完成的周期数目，单位为赫兹。
6. $f = 1/5\mu s = 200kHz$
7. $T = 1/120Hz = 8.33ms$

8.2 节

1. (a) $V_{pp} = 2\times1V=2V$
   (b) $V_{pp}=2\times1.414\times1.414V=4V$
   (c) $V_{pp}=2\times1.57\times3V=9.42V$
2. (a) $V_{rms}=0.707\times2.5V=1.77V$
   (b) $V_{rms}=0.5\times0.707\times10V=3.54V$
   (c) $V_{rms}=0.707\times1.57\times1.5V=1.66V$
3. (a) $V_{avg}=0.637\times10V=6.37V$
   (b) $V_{avg}=0.637\times1.414\times2.3V=2.07V$
   (c) $V_{avg}=0.637\times0.5\times60V=19.1V$

8.3 节

1. (a) 正峰值在 90°
   (b) 负向过零点在 180°
   (c) 负峰值在 270°
   (d) 周期结束在 360°
2. 半个周期在 180°或 π 弧度内完成。
3. 一个周期在 360°或 2π 弧度内完成。
4. $\theta = 90° - 45° = 45°$

8.4 节

1. (a) $\sin30°=0.5$
   (b) $\sin60°=0.866$
   (c) $\sin90°=1$
2. $v=10\sin120°V=8.66V$
3. $v=10\sin(45°+10°)V=8.19V$

8.5 节

1. $I_p=V_p/R=1.57\times12.5V/330\Omega=59.5mA$
2. $V_{s(rms)}=0.707\times25.3V=17.9V$
3. $+V_{max}=5V+2.5V=7.5V$
4. 是的，电压将交变极性。
5. $+V_{max}=5V-2.5V=2.5V$

8.6 节

1. 磁极数目与转子转速。
2. 无需用电刷来输出电流。
3. 为大型交流发电机提供转子电流的直流发电机。
4. 二极管将从定子得到的交流转换成直流输出。

8.7 节

1. 差别在转子。感应电动机转子通过变压器作用得到电流；而同步电动机转子是永磁铁或电磁铁，由外部电源通过集电环与电刷给电磁铁供电。
2. 磁场大小恒定。
3. 鼠笼由电导体构成，使得转子能产生电流。
4. 转差是指定子磁场的同步转速与转子转速之差。

8.8 节

1. (a) 上升时间是脉冲从其幅度的 10%上升到 90%所需的时间。
   (b) 下降时间是脉冲从其幅度的 90%下降到 10%所需的时间。
   (c) 脉冲宽度是从脉冲前沿 50%到脉冲后沿 50%的时间间隔。
2. $f=1/1ms=1kHz$
3. 占空比 = (1/5) × 100% = 20%；幅度 = 1.5V；$V_{avg}=0.5V+0.2\times(1.5V)=0.8V$
4. $T=16ms$
5. $f=1/T=1/1\mu s= 1MHz$
6. 基频是波形的重复率。
7. 二次谐波为 2kHz
8. $f= 1/10\mu s=100kHz$

8.9 节

1. 数字：信号转换成数字处理，然后再重构显示。
   模拟：信号直接驱动显示。
2. 垂直测量电压。
3. VOLTS/DIV（伏/格）控件设置垂直标尺每一格所表示的电压伏特数。
4. SEC/DIV（秒/格）控件设置水平标尺每一格所表示的时间。
5. 大多数情况都使用×10 探头测量电压，除非测量非常微弱的电压。

8.10 节

1. 信号发生器一定范围（幅度和频率）内的任意信号，波形可以通过多种方法指定。
2. 输出正弦波的频率在两个指定频率之间循环变化的信号发生器。
3. 如果信号发生器没有良好的频谱纯度，待测单元某些测量可能失真。
4. 用含信息的信号去改变另一信号特征的过程。
5. 每次触发输出指定周期数信号的模式。

例题中相关问题答案

例8-1 2.4s

例8-2 1.5ms

例8-3 20kHz

例8-4 200Hz

例8-5 1ms

例8-6 $V_{pp}=50V$；$V_{rms}=17.7V$；$V_{avg}=15.9V$

例8-7 (a) $\pi/2$ 弧度 (b) 112.5°

例8-8 8°

例8-9 18.1V

例8-10 $I_{rms}=4.53mA$；$V_{1(rms)}=4.53V$；$V_{2(rms)}=2.54V$；$P_{tot}=32mV$

例8-11 23.7V

例8-12 图8-39a波形非负，图8-39b波形在一周期的部分时间进入负值。

例8-13 250r/m

例8-14 5%

例8-15 1.2V

例8-16 120V

例8-17 (a) $V_{rms}=1.06V$；$f=50Hz$

(b) $V_{rms}=88.4mV$；$f=1.67kHz$

(c) $V_{rms}=4.81V$；$f=5kHz$

(d) $V_{rms}=7.07V$；$f=250kHz$

例8-18 0.6V

是非测验题答案

1.T 2.F 3.F 4.T 5.T 6.F 7.T 8.F 9.F 10.T 11.T 12.F

自测题答案

1. (b) 2. (b) 3. (c) 4. (b) 5. (d) 6. (a) 7. (a) 8. (a) 9. (c) 10. (b) 11. (a) 12. (d) 13. (c) 14. (b) 15. (d) 16. (b) 17. (d) 18. (c)

故障排除：征兆与原因的答案

1. (c) 2. (c) 3. (b) 4. (a) 5. (b)

第9章 电容器

本章目标

- 描述电容器的基本结构与特性
- 讨论各种类型的电容器
- 分析串联电容器
- 分析并联电容器
- 描述在直流开关电路中电容器的工作原理
- 描述在交流电路中电容器的工作原理
- 讨论电容器的一些应用

电容器是一种能够存储电荷并建立电场存储能量的器件，电容量是电容器存储电荷能力的度量⊖。

本章介绍基本电容器并研究其特性，讨论各种类型电容器的物理结构和电气性质，分析电容器的串、并联组合；学习电容器在直流电路和交流电路中的基本特性；讨论一些系统中应用的有代表性的电路；一个例子是，几乎所有非电池供电系统都用到电源，都是将交流电网电压转换为直流电源，而电容器则是电源电路中的重要部件，本章将讨论这些内容。

9.1 基本电容器

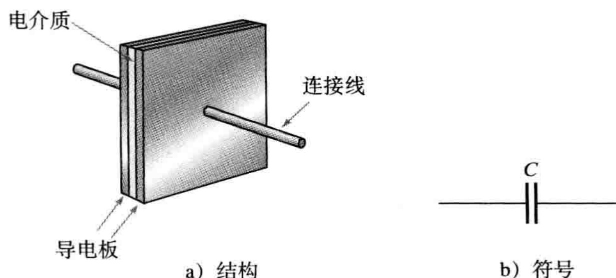
电容器是一种能够存储电荷的无源电器元件，具有电容量特性。

学习完本节内容，应该能够

- 描述基本电容器的结构与特性；
- 说明电容器存储电荷的原理；
- 定义电容量并指出其单位；
- 说明电容器存储能量的原理；
- 讨论电容器的额定电压与温度系数；
- 说明电容器的漏电；
- 指明电容器的物理特性怎样影响电容量。

9.1.1 基本结构

基本电容器的最简单形式是由绝缘材料隔离的两个平行导电板构成的电子器件。导电板之间隔离的绝缘材料称为电介质，两平行导电板分别连接出引线。基本电容器如图 9-1a 所示，图 9-1b 显示这种电容器的电路符号。

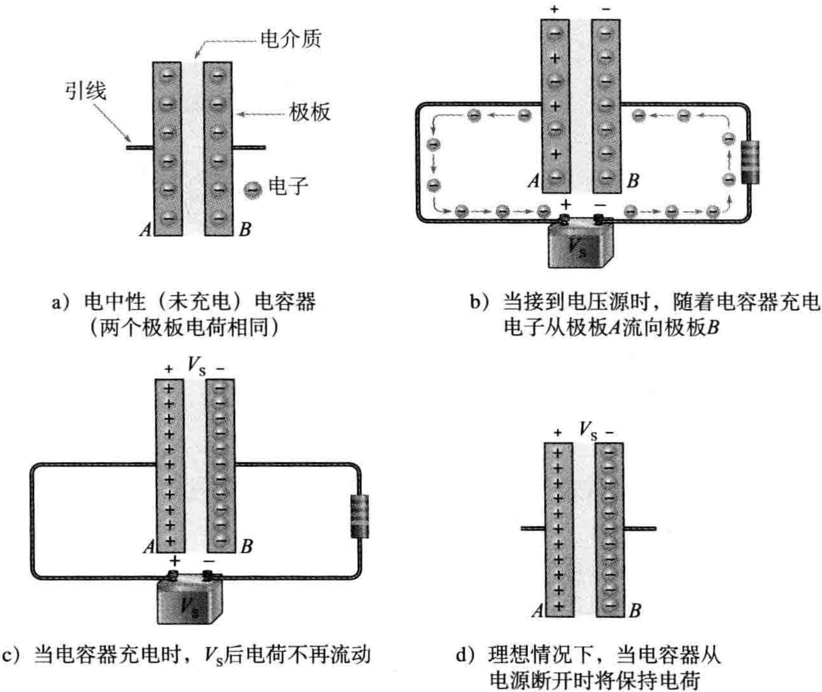


a）结构　　b）符号

图 9-1　基本电容器

⊖ 在不引起误会的情况下，电容器和电容量都简称为电容。——译者注

在自然状态下，电容器的两个极板上带有等量的自由电子，如图 9-2a 所示。当电容器通过电阻接到直流电压源上时，如图 9-2b 所示，电子（负电荷）从极板 A 移出，而在极板 B 沉积等量的电子。随着极板 A 失去电子和极板 B 获得电子，极板 A 相对于极板 B 变为正极。在此充电过程中，电子流只能通过连接引线和电源，没有电子流过电容器的电介质，因为它是一种绝缘体。当电容器两端电压等于电源电压时，电子的运动停止，如图 9-2c 所示。此时如果把电容器从电源断开，它保留所存储的电荷很长一段时间（时间长度取决于电容器的类型），在电容器两端仍然有电压，如图 9-2d 所示。带电电容器可以当做临时的电池。



a）电中性（未充电）电容器（两个极板电荷相同）

b）当接到电压源时，随着电容器充电电子从极板A流向极板B

c）当电容器充电时，V_S后电荷不再流动

d）理想情况下，当电容器从电源断开时将保持电荷

图 9-2　电容器存储电荷演示

9.1.2　电容量

电容器极板两端单位电压所能存储的电荷量称为电容器的电容量，用 C 表示，电容量是电容器存储电荷能力的度量。单位电压电容器存储的电荷越多，电容量越大，可用下列公式表示：

$$C=\frac{Q}{V} \tag{9-1}$$

式中，C 为电容量，Q 为电荷，V 为电压。

对式（9-1）整理可得另外两个公式：

$$Q=CV \tag{9-2}$$

$$V=\frac{Q}{C} \tag{9-3}$$

电容（量）的单位　电容的基本单位是法拉（F），回顾一下电荷的单位是库仑（C）。

1F 电容量就是当电容器极板之间电压为 1V 时能存储 1C 电荷。

多数电子产品中所使用电容器的电容值在微法（μF）、皮法（pF）量级，有时候，电路原理图中还会有纳法（nF）级电容。一微法等于百万分之一法拉（$1\mu F = 1\times10^{-6}$ F），一皮法等于一万亿分之一法拉（$1pF = 1\times10^{-12}$ F）。表9-1给出了法拉、微法和皮法的转换。

表9-1 法拉、微法和皮法的转换

原单位	转换单位	小数点移动
法拉	微法	右移6位（$\times10^{6}$）
法拉	皮法	右移12位（$\times10^{12}$）
微法	法拉	左移6位（$\times10^{-6}$）
微法	皮法	右移6位（$\times10^{6}$）
纳法	法拉	左移9位（$\times10^{-9}$）
纳法	微法	左移3位（$\times10^{-3}$）
皮法	法拉	左移12位（$\times10^{-12}$）
皮法	微法	左移6位（$\times10^{-6}$）

【例9-1】 （a）当某电容器极板加10V电压时存储50μC电荷，试问电容量是多少？

（b）2.2μF电容器极板间电压为100V，试问它存储了多少电荷？

（c）求100pF电容器存储2μC电荷时极板之间的电压。

解：（a）
$$C=\frac{Q}{V}=\frac{50\mu C}{10V}=5\mu F$$

（b）$Q=CV=2.2\mu F\times100V=220\mu C$

（c）$V=\frac{Q}{C}=\frac{2\mu C}{100pF}=20kV$

相关问题：如果$C=1000pF$，$Q=10\mu C$，试求V。

【例9-2】 将下列电容值转换为微法。

（a）0.000 01F　（b）0.0047F　（c）1000pF　（d）220pF

解：（a）$0.000\,01F\times10^{6}\mu F/F=10\mu F$

（b）$0.0047F\times10^{6}\mu F/F=4700\mu F$

（c）$1000pF\times10^{-6}\mu F/pF=0.001\mu F$

（d）$220pF\times10^{-6}\mu F/pF=0.000\,22\mu F$

相关问题：将47 000pF转换为微法。

【例9-3】 将下列电容值转换为皮法。

（a）0.01×10^{-6}F　（b）0.000 027F　（c）0.001μF　（d）0.0047μF

解：（a）$0.1\times10^{-8}F\times10^{12}pF/F=1000pF$

（b）$0.000\,027F\times10^{12}pF/F=27\times10^{6}pF$

（c）$0.01\mu F\times10^{6}pF/\mu F=10\,000pF$

（d）$0.0047\mu F\times10^{6}pF/\mu F=4700pF$

相关问题：将100μF转换为皮法。

9.1.3 电容器储能原理

电容器以电场形式存储能量，电场由两个极板上存储的极性相反的电荷建立。电场用正电荷与负电荷之间的电场线表示，电场集中在电介质内，如图9-3所示。

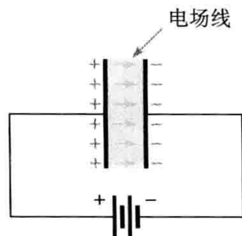


图9-3 在电容器中电场储能，阴影区域表示电介质

在图9-3中，电容器极板连接到电池并从电池获得电荷，在两极板之间建立电场并存储能量。电场存储的能量与电容器大小和电压的平方直接相关，由下列公式给出：

$$W=\frac{1}{2}CV^{2} \tag{9-4}$$

当电容（C）的单位是法拉、电压（V）的单位是伏特时，能量（W）的单位是焦耳。

9.1.4 额定电压

每个电容器极板间能够承受的电压都有一个限制，电压额定值是指器件没有损坏危险所能施加的最大直流电压，这个最大电压通常称为击穿电压或工作电压，超过该最大电压，可导致电容器永久性损坏。

在电路中使用电容器之前，必须同时考虑电容量和额定电压。电容值的选择基于特定电路的要求，电压额定值的选择应始终高于特定应用中可能的最大电压。

介电强度 电容器的击穿电压由所使用电介质的介电强度决定，介电强度表达为 V/mil（每密尔伏特，1mil＝0.001in＝2.54×10^{-5}m)，表 9-2 列出了几种材料的典型值，精确值取决于具体的材料组合。

表 9-2 一些常用电介质材料及其介电强度

材料	介电强度（V/mil)
空气	80
石油	375
陶瓷	1000
纸张（石蜡）	1200
特富龙®	1500
云母	1500
玻璃	2000

最好用一个例子来解释电容器的介电强度，假设某电容器的极板间隔为 1mil，介电材料是陶瓷，介电强度为 1000V/mil，则这种特殊电容可承受的最大电压为 1000V。如果使用中超过最大电压，电介质可能分解并传导电流，造成电容器永久性损坏。如果陶瓷电容器极板间隔为 2mil，则其击穿电压为 2000V。

9.1.5 温度系数

温度系数表示电容量随温度变化的大小与方向，正的温度系数意味着电容量随温度升高而变大或随温度降低而变小，负的温度系数表明电容量随温度升高而变小或随温度降低而变大。

温度系数通常用每摄氏度百万分之（ppm/℃）来表示，例如，1μF 电容器的负温度系数为 150ppm/℃，意味着温度每上升 1℃ 电容量减小 150pF（一微法等于一百万皮法)。

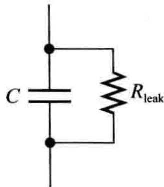


图 9-4 非理想电容器的等效电路

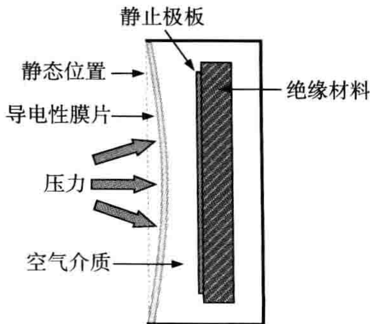
9.1.6 漏电

没有一种绝缘材料是完美的。任何电容器的电介质，都将会传导非常小的电流，因此，电容器上的电荷最终会泄漏掉。有些电容器的泄漏比较高。非理想电容器的等效电路如图 9-4 所示，并联电阻 R_{leak} 代表流过漏电流的介电材料漏电阻，该电阻阻值极高（几百 kΩ 以上)。

系统注释 电容式传感器

系统中常见的电容式传感器用于测量压力、接近度、湿度、液位等物理量，电容式传感器是一种响应物理激励的可变电容器。在压力电容式传感器中，由导电的柔性膜片构成电容器的一个极板，另一个板是固定的，当压力使柔性膜片移动时，就会改变电容量，电容的变化可以被外部电路检测到。

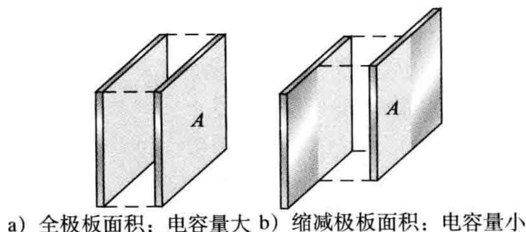
在电容式接近传感器中，电容器的一块极板实际上是一个移动的物体（如旋转轴上的凸轮)。其他传感器可能改变电介质，如在液位传感器中。



9.1.7 电容器的物理参数

在建立电容器电容与额定电压之间的关系时，以下物理量是非常重要的，极板面积、极板间距和介电常数。

极板面积 电容量正比于电容器的极板面积 A，极板面积越大电容越大，而极板面积越小电容越小。图 9-5a 所示为平板电容器的极板面积其中一块极板的面积。如图 9-5b 所示，如果极板存在相对移动，由重叠面积确定有效极板面积。这种有效极板面积 A 的变化是某些可调电容器的基础。

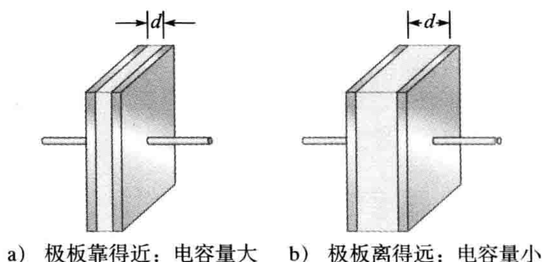


a）全极板面积：电容量大 b）缩减极板面积：电容量小

图 9-5 电容量与极板面积（A）成正比

极板间距 电容量反比于两极板之间的距离。极板间距记为 d，如图 9-6 所示，极板间距越大电容量越小，如图 9-6 所示。击穿电压正比于极板间距。极板间距越大，击穿电压越大。

介电常数 电容板之间的绝缘材料称为电介质，每种电介质材料都具有集中电场线的能力，带相反电荷的电容器两极板之间存在电场，电介质能增加能量存储的能力。材料建立电场的能力称为介电常数或相对介电系数，用符号（希腊字母）ε_r表示。



a）极板靠得近：电容量大 b）极板离得远：电容量小

图 9-6 电容量与极板间距离 d 成反比

电容量正比于介电常数。真空的介电常数为 1，空气的介电常数接近 1。真空介电常数作为参考，其他材料的 ε_r值都是特指相对于真空或空气，例如，若其他因素相同，$\varepsilon_r=5$ 的材料作介质的电容量是空气介质的五倍。

表 9-3 列出了几种常用介电材料及其典型介电常数值，根据材料的组合介电常数会有所变化。

表 9-3 常用介电材料及其介电常数

材料	典型 ε_r值
空气（真空）	1.0
特富龙®	2.0
纸张（石蜡）	2.5
石油	4.0
云母	5.0
玻璃	7.5
陶瓷	1200

介电常数（相对介电系数）是一个相对量，无量纲，是材料的绝对介电系数 ε 与真空绝对介电系数 ε_0 的比值，如下式所示：

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{9-5}$$

ε_0的值为 8.85×10^{-12}F/m（每米法拉）。

电容量公式 我们已经看到，电容量与面积 A 和介电常数ε_r成正比，与极板间距 d 成反比，由这三个量计算电容量的准确公式为

$$C = \frac{A\varepsilon_r(8.85\times10^{-12}\text{F/m})}{d} \tag{9-6}$$

式中，A 的单位为平方米（m^2），d 的单位为米（m），C 的单位为法拉（F）。

【例 9-4】 平板电容器的极板面积为 $0.01m^2$，极板间距为 0.5mil（1.27×10^{-5}m），电介质为云母，其介电常数为 5.0，请确定电容器的电容量（单位：μF）。

解：利用式（9-6）

$$C = \frac{A\varepsilon_r(8.85\times10^{-12}\text{F/m})}{d} = \frac{(0.01\text{m})^2\times5.0\times8.85\times10^{-12}\text{F/m}}{1.27\times10^{-5}\text{m}} = 0.035\mu\text{F}$$

相关问题：若 $A = 3.6 \times (10^{-5}\text{m})^2$，$d = 1\text{mil}$ $(2.54 \times 10^{-5}\text{m})$，电介质为陶瓷，请确定电容器的电容量（单位：$\mu$F）。

本节测试题

1. 请给出电容量的定义。
2. (a) 一法拉等于多少微法？
   (b) 一法拉等于多少皮法？
   (c) 一微法等于多少皮法？
3. 将 0.0015μF 转换成皮法和法拉。
4. 0.001μF 电容器两端电压为 15V，试问其中存储的能量有多少焦耳？
5. (a) 电容器极板面积增大时电容量增加还是减小？
   (b) 电容器极板间距离增大时电容量增大还是减小？
6. 陶瓷电容器的极板间距为 2mil，试问典型的击穿电压为多少？

9.2 电容器的种类

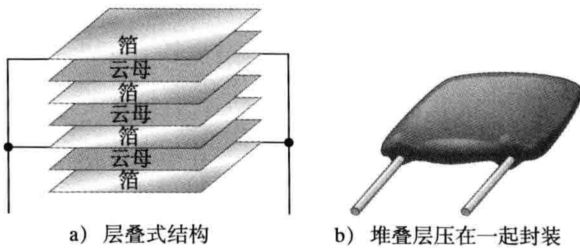
电容器通常根据所使用的介电材料来分类，最常见的介电材料类型有云母、陶瓷、塑料薄膜和电解质（三氧化二铝和五氧化二钽）。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论各类电容器；
- 描述云母、陶瓷、塑料薄膜和电解质电容器的特性；
- 描述可调电容器的类型；
- 识别电容器标签；
- 讨论电容量的测量。

9.2.1 固定电容器

云母电容器 层叠箔和银云母是云母电容器的两种类型。图 9-7 所示为层叠箔式的基本结构，由交替的金属箔层与薄片云母构成。金属箔构成电容器的极板，交错叠放的箔片连接在一起增加了极板面积，多层也是用来增加极板面积，从而增大电容量。云母/箔堆叠封装在绝缘材料如酚醛塑料®中，如图 9-7b 所示。银云母电容器是选用银电极材料和云母片用类似方式层叠制成。



a) 层叠式结构　　b) 堆叠层压在一起封装

图 9-7 典型的径向引线云母电容器结构

云母电容器的电容值范围一般从 1pF～0.1μF，额定电压范围从直流 100V～2500V 甚至更高，云母的典型介电常数为 5。

陶瓷电容器 陶瓷电介质的介电常数非常高（典型值为 1200），因此，可以在小的物理尺寸上实现比较高的电容值。陶瓷电容器的常见形式有图 9-8 所示的陶瓷片式、图 9-9所示的多层径向引线结构或图 9-10 所示的无引线陶瓷芯片式。

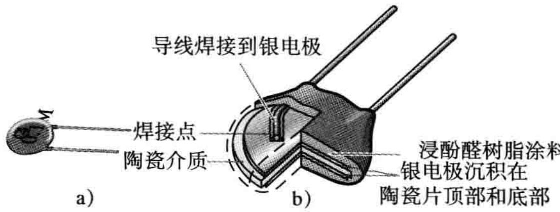
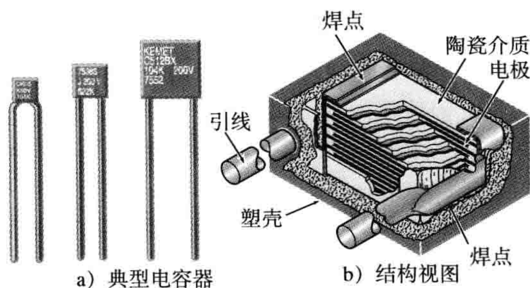


图 9-8 陶瓷片式电容及其基本结构

陶瓷电容器的电容值范围从 1pF～100μF，额定电压可达到 6kV。



a）典型电容器 b）结构视图

图 9-9 陶瓷电容器举例

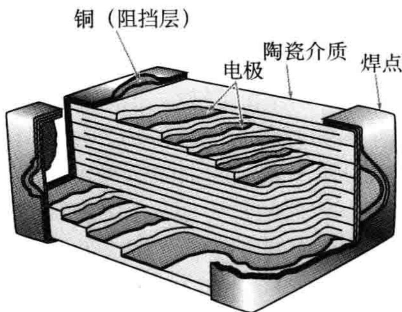


图 9-10 贴在印制电路板表面的典型陶瓷芯片电容器结构图

小贴士 贴片电容器用在印制电路板作表面贴装，导电端子镀在两端。在自动化电路板组装过程中，电容器将承受回流焊和波峰焊的熔融焊料温度。贴片电容器因为体积小所以需求量很大。

塑料薄膜电容器 常见塑料薄膜电容器使用的介电材料包括聚碳酸酯、丙烯、聚酯、聚苯乙烯、聚丙烯和聚酯薄膜。有些塑料薄膜电容器电容值可高达100μF，但大多数小于1μF。

图 9-11 显示了许多塑料薄膜电容器的基本结构，塑料膜介质细带夹在两层薄金属条极板之间，一条引线连接到内板，另一条连接到外板，然后盘卷起来并封装成型，因此，大极板面积可以打包成相对较小的物理尺寸，从而实现大电容值。另一种方法是将金属直接沉积在膜介质上形成极板。

图 9-12a 显示了典型的塑料薄膜电容器，图 9-12b 显示了一种轴向引线塑料薄膜电容器的结构图。

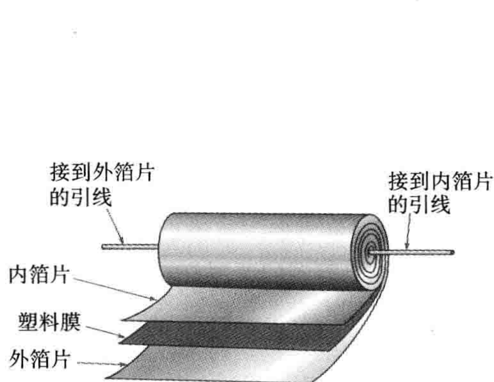
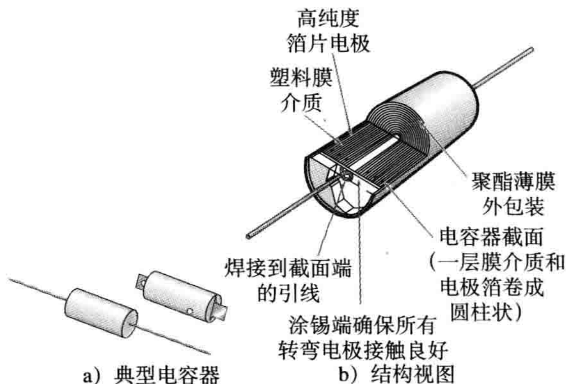


图 9-11 轴向引线管状塑料膜介质电容器的基本结构



a）典型电容器 b）结构视图

图 9-12 塑料薄膜电容器举例

电解电容器 电解电容器是有极性的，一个极板为正极性，另一个为负极性。电解电容器的电容量通常较大，从1μF到超过200 000μF，但击穿电压相对较低（典型的最大电压是350V，偶尔会有更高的电压）且泄漏较大。

制造商已经开发了电容量更大的新型电解电容器，然而，这些新电容器的额定电压比小电容量的电容器更低且价格昂贵，已经出现了数百法拉的超级电容器，这些电容器用做备用电池和类似小型电动机起动器这样需要非常大电容量的场合。

安全提示 使用电解电容器要格外小心，因为与一般电容器相比电解电容器的连接方式不

同，请务必按照正确的极性连接，如果电容器极性接反了，可能会爆炸并导致人身伤害。

电解电容器的电容量比云母电容器或陶瓷电容器更高，但其额定电压通常较低。其他电容器都使用两个相似的极板，电解电容器的一个极板由铝箔制成，另一个极板由导电电解质板制成，如塑料薄膜和其他适用的材料，两个“极板”由铝板表面形成的一层三氧化二铝分隔开。图 9-13a 显示了典型的轴向引线式铝电解电容器结构，其他径向引线电解电容器如图 9-13b 所示，电解电容器的符号如 9-13c 所示。

钽电解电容器可以做成类似图 9-13 所示的管状结构或图 9-14 所示的“泪滴”形。在泪滴结构中，正极板实际上是钽粉末颗粒而不是一个箔片，五氧化二钽构成电介质，二氧化锰构成负极板。

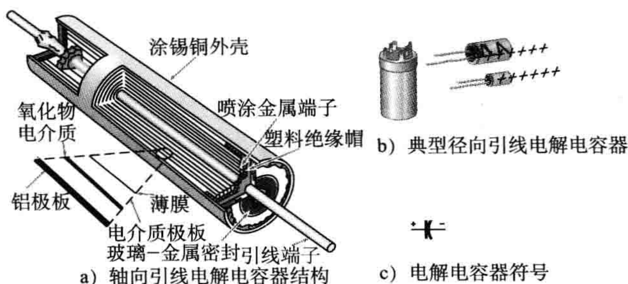


图 9-13 电解电容器举例

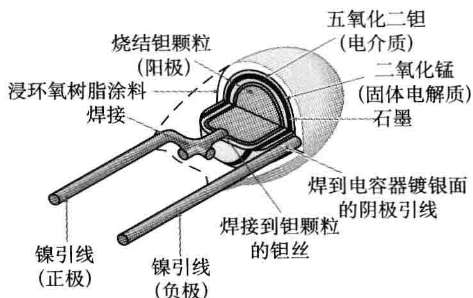


图 9-14 典型“泪滴”形钽电解电容器结构图

由于氧化电介质的绝缘缘故，相对于电解质极板，金属（铝或钽）极板始终是正的，因而电解电容器是有极性的。电容器上金属极板（正极引线）通常是用加号或者其他明显标记指示，必须始终连接在电容两端电压不改变极性的直流电路中，电压极性反转可能导致电容器的完全损坏。

小贴士 科学家们正在使用碳系材料石墨改进可充电电池和超级电容器的电荷存储。存储大量电荷的能力在办公用复印机、提高电动和混合动力汽车效率等许多应用中都是非常重要的。这项新技术可以加快发展风能和太阳能等可再生能源，其中需要能够存储大量的能量。

9.2.2 可调电容器

当需要通过手动或自动调整电容量时，电路中可使用可调电容器，可调电容器一般小于 300pF，但一些专门应用中可能有较大值。图 9-15 所示为可调电容器的原理符号。

通常带有狭槽螺钉型调节，用于电路中非常精细调整的可调电容器称为微调电容。陶瓷或云母是这类电容器常见的电介质，一般通过调整极板间距来改变电容量。通常，微调电容值小于 100pF。图 9-16 显示了一些典型电容器。



图 9-15 可调电容器的原理符号

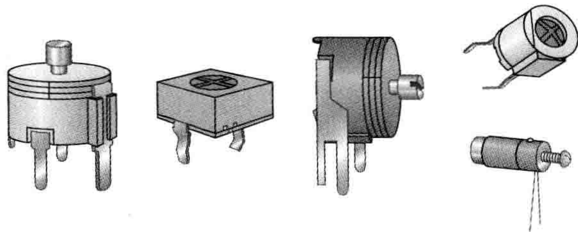


图 9-16 微调电容器

变容二极管是一种具有电容特性的半导体器件，通过改变其两端的电压可以调节电容量，该器件通常在电子器件课程中详细介绍。

9.2.3 电容器标签

电容器的电容值通过数字或字母数字标签标记在电容器外壳上，有时也用色码。电容器标签标记各种参数，如电容、额定电压和容差。

有些电容器指示电容量时不带单位，在这些情况下，单位在指示值中暗示并由经验确定。例如，陶瓷电容器标记为 0.001 或 0.01，单位是微法，因为皮法值太小而不可用；另一个例子，陶瓷电容器标记 50 或 330，单位是皮法，因为微法太大，这种类型电容器不可实现。某些情况下，使用三位数字指定电容值，前两个数字是电容值的前两位数字，第三个数字是乘数或第二位数字后零的个数，例如，103 代表 10 000pF。有些情况下单位标记为 pF 或 μF，有时单位微法被标为 MF 或 MFD。

某些类型电容器的额定电压用 WV 或 WVDC 标记，有些电容器省略额定电压。当额定电压省略时，可由制造商所提供的信息得到。电容器的容差通常标记为百分比，例如±10%。温度系数用百万分之标记，这类标签由 P 或 N 后跟一个数字构成，例如，N750 表示负温度系数为 750ppm/℃，P30 表示正温度系数为 30ppm/℃，NP0 表示正和负系数均为零，因此，电容不随温度变化。某些类型电容器使用色码。更多电容标签和颜色代码信息参阅附录 B。

9.2.4 电容的测量

图 9-17 所示的电容表可用来检查电容值，许多数字万用表也提供电容测量功能。所有电容器使用一段时间后电容值都会或多或少发生变化。例如，陶瓷电容器在第一年内常存在 10%～15%的电容值变化。由于电解质溶液干燥，电解电容器的值变化特别大。其他情况下，电容器可能标记不正确或可能在电路中安装了大小错误的电容器。虽然缺陷电容器表述的电容值变化小于 25%，但是，排除电路故障时应对电容值作检查以尽快消除故障的根源，只需连接电容器，设置开关，就可以测量 200pF～50 000μF 的电容器并在屏幕上显示读数。



图 9-17 典型电容表（图片经 B&K Precision 公司许可使用）

某些电容表也可用于检查电容器的泄漏电流。为了检查泄漏，必须在电容两端加足够电压以模拟工作条件，这由测试仪器自动完成。超过 40%的缺陷电容器的泄漏电流都过大，电解电容对这个问题特别敏感。

本节测试题

1. 电容器通常如何分类？
2. 固定电容器与可调电容器的区别是什么？
3. 什么类型的电容器通常是有极性的？
4. 在电路板上安装有极性电容时，必须采取什么样的预防措施？
5. 电解电容器接在负电源电压和地之间，试问电容器哪条引线应连接到地？

9.3 串联电容

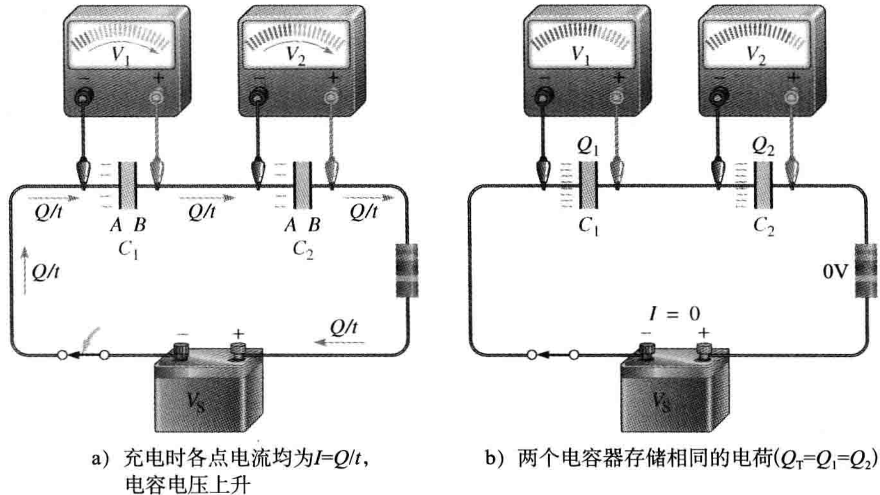
电容器串联连接的总电容量小于各个串联电容器的电容量。串联电容器两端分得的电压与其电容量成反比，因此，电容量较大的串联电容器比电容量较小的电容器分得的电压小。

学习完本节内容，应该能够

- 分析串联电容器；
- 确定串联总电容量；
- 确定电容器的电压。

当电容器串联连接时，由于极板的有效间距增加，总电容量小于最小的电容值，总串联电容的计算方法与并联电阻的总电阻计算（见第5章）类似。

以两个电容器的串联来说明如何确定总电容。图9-18显示了两个初始不带电的电容器，二者串联连接到直流电压源。当开关闭合时，电路中开始有电流，如图9-18a所示。



a）充电时各点电流均为$I=Q/t$，电容电压上升

b）两个电容器存储相同的电荷($Q_T=Q_1=Q_2$)

图9-18 电容器串联得到小于最小值的总电容

回顾串联电路中各点电流相同，而电流定义为电荷流动的速率（$I=Q/t$），在一定时间内流过电路一定量的电荷，由于图9-18a中各处电流都相同，所以从电源负极流到C_1的A极板的电荷、从C_1的B极板流到C_2的A极板的电荷、从C_2的B极板流到电源正极的电荷相同，结果当然在给定时间内各个电容器两个极板上沉积的电荷是等量的，电路移动的总电荷（Q_T）等于C_1存储的电荷，也等于C_2存储的电荷。

$$Q_T = Q_1 = Q_2$$

随着电容器充电，各个电容器两端的电压也如图所示增大。

图9-18b显示了完全充电后的电容器并且电流终止。两个电容器存储等量电荷（Q），两端电压取决于电容量（$V=Q/C$），基尔霍夫电压定律同样适用于电容电路和电阻电路，根据定律，电容器电压之和等于电源电压。

$$V_S = V_1 + V_2$$

应用公式$V=Q/C$，代入基尔霍夫定律的公式中，得到下列关系（此处$Q_T=Q=Q_1=Q_2$）：

$$\frac{Q}{C_T} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

Q是等式右边的公因子，和等式左边的Q相抵消，

$$\frac{Q}{C_T} = Q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)$$

因此，我们得到两个电容器串联的关系：

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

等式两边取倒数，得到两电容器串联的总电容公式

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

该式还可等价表达成

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \tag{9-7}$$

【例 9-5】　求图 9-19 中的总电容。

解：$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{100\text{pF} \times 330\text{pF}}{100\text{pF} + 330\text{pF}} = 76.7\text{pF}$

相关问题：如果图 9-19 中 $C_1 = 470\text{pF}$，$C_2 = 680\text{pF}$，求 C_T。

通用公式　虽然在实际电路中两个以上电容器串联是罕见的，但是假如这种情况出现，我们应该知道该通用公式。两个电容器串联的公式可以推广到任意个电容器串联，如图 9-20 所示。

任意个电容器串联的总电容公式推导如下，下标 n 为任意正整数。

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n}} \tag{9-8}$$

记住，**串联总电容总是小于最小的电容。**

【例 9-6】　求图 9-21 中的总电容。

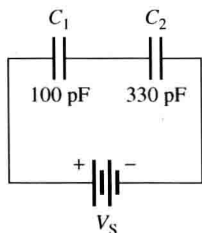


图　9-19

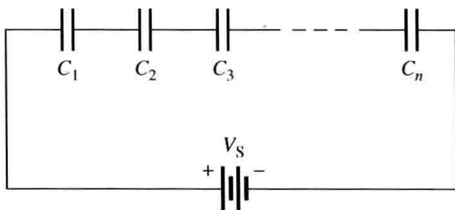


图 9-20　n 个电容器串联的一般电路

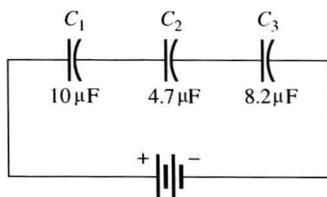


图　9-21

解：$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \frac{1}{\frac{1}{10\mu\text{F}} + \frac{1}{4.7\mu\text{F}} + \frac{1}{8.2\mu\text{F}}} = 2.30\mu\text{F}$

相关问题：在图 9-21 中，如果再有一个 4.7μF 的电容和现有的电容串联，试问 C_T 为多大？

电容电压

根据公式 $V = Q/C$，串联连接的各个电容两端的电压取决于其电容量，用下面的公式可以确定各个串联电容器两端的电压：

$$V_x = \left(\frac{C_T}{C_x}\right) V_S \tag{9-9}$$

式中，C_x 是任意串联电容，如 C_1、C_2、C_3 等，V_x 是 C_x 两端的电压。

串联连接的最大电容器两端将得到最小电压，而最小电容器两端将得到最大电压。

【例 9-7】　求图 9-22 中各个电容器两端的电压。

解： 计算总电容

$$C_T = \frac{1}{\dfrac{1}{C_1}+\dfrac{1}{C_2}+\dfrac{1}{C_3}} = \frac{1}{\dfrac{1}{100\mu F}+\dfrac{1}{470\mu F}+\dfrac{1}{220\mu F}} = 60\mu F$$

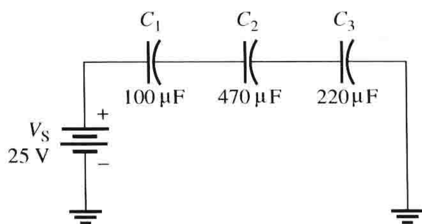


图　9-22

各个电压如下

$$V_1 = \left(\frac{C_T}{C_1}\right)V_S = \frac{60\mu F}{100\mu F}\times 25V = 15.0V$$

$$V_2 = \left(\frac{C_T}{C_2}\right)V_S = \frac{60\mu F}{470\mu F}\times 25V = 3.19V$$

$$V_3 = \left(\frac{C_T}{C_3}\right)V_S = \frac{60\mu F}{220\mu F}\times 25V = 6.82V$$

相关问题：在图 9-22 中，另有一个 470μF 的电容器和现有的电容器串联，求新电容器两端的电压，假设所有电容初始均未充电。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E09-07，测量每个电容器两端的电压并与计算值比较，将另一个 470μF 的电容器与其他三个电容器串联，测量新电容器两端的电压，同样测量 C_1、C_2、C_3 两端的电压并与前面的值比较，试问增加了第四个电容器后这些电压是增大还是减小？为什么？

系统举例 9-1　考毕兹振荡器中的反馈

振荡器是一种生成重复波形的电路，正弦波振荡器用在许多系统中并作为测试信号。图 9-23 所示为一个用来产生 550kHz 正弦波的正弦波振荡器，该正弦波用在调幅（AM）收音机中与天线接收频率进行混频。这个电路是应用反馈网络的一个例子，输出的一部分通过反馈网络返回到输入端进行放大并增强输出信号。反馈网络显示在阴影框内，我们主要关注反馈网络中的电容器，虽然这个电路是交流电路，但是直流电路中关于电容量和电容电压的公式仍然有效。

电容器 C_1 和 C_2 串联并与 L 组成谐振电路（谐振电路将在第 13 章介绍），C_1 和 C_2 串联总电容由式（9-7）得到：

$$C_T = \frac{C_1C_2}{C_1+C_2} = \frac{2.2nF\times 220pF}{2.2nF+220pF} = 200pF$$

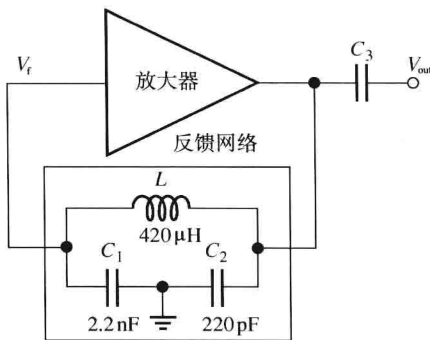


图 9-23　表示反馈网络的考毕兹振荡器

放大器的信号参考地，所以反馈信号 V_f 为 C_1 两端电压的一部分，注意，V_f 返回放大器的输入端，用 V_{out} 替代 V_S、V_f 替代 V_x，利用式（9-9）可以求得输出反馈的分量（V_f/V_{out}）。

$$\frac{V_x}{V_S} = \frac{V_f}{V_{out}} = \frac{C_T}{C_1} = \frac{220pF}{2.2nF} = 0.0909 = 9.1\%$$

从这个结果可以看出，大电容在输出电压中分量较小，放大器的增益必须大到足以维持振荡恢复 100%输出电压。反馈网络决定了考毕兹振荡器的放大器部分所需的增益，反馈仅返回了 9.1%的输出，所以增益必须为 11（9.1%×11=100%）。

本节测试题

1. 试问串联电容器的总电容是小于还是大于　　　最小电容器的值？

2. 电容器 100pF、220pF 和 560pF 串联，试问总电容为多大？
3. 求 0.01μF 和 0.0015μF 电容器串联的总电容。
4. 若问题 3 中两串联电容接 10V 电源电压，求 0.01μF 电容器两端的电压。

9.4 并联电容

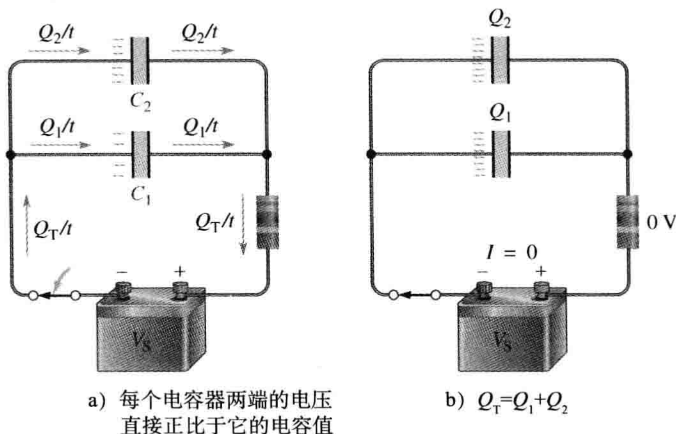
当电容器并联连接时，电容量相加。在并联电路中，各个电容器两端的电压与电源电压相同。

学习完本节内容，应该能够

- 分析并联电容器；
- 确定总电容。

当电容器并联时，由于有效极板面积增大，所以总电容为各个电容之和。总并联电容的计算类似于串联总电阻的计算（见第 4 章）。

图 9-24 显示了两个并联电容器接在电压源上，当如图 9-24a 所示闭合开关时，电流开始流动，在一段时间内通过电路移动了总电荷（Q_T），总电荷的一部分存储在 C_1 中，另一部分存储在 C_2 中。根据关系式 $Q=CV$，总电荷存储到各个电容器的分量取决于其电容。



a) 每个电容器两端的电压直接正比于它的电容值　　b) $Q_T=Q_1+Q_2$

图 9-24　两个电容器并联

图 9-24b 显示电容器充电完成后的情况，这时电流停止。因为两个电容器两端电压相同，容量大的电容器存储的电荷较多。如果两个电容器等值，则存储等量的电荷。存储在两个电容器中的电荷合在一起等于从电源输送出来的电荷量。

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

利用式（9-2）$Q = CV$，可以得到下列关系

$$C_T V_S = C_1 V_S + C_2 V_S$$

等式两边消去 V_S项，两电容器并联的总电容为

$$C_T = C_1 + C_2 \tag{9-10}$$

【例 9-8】　试问图 9-25 的总电容为多少？各个电容器两端电压为多少？

解： 总电容为　　$C_T = C_1 + C_2 = 330\text{pF} + 220\text{pF} = 550\text{pF}$

各个并联电容器两端电压等于电源电压

$$V_S = V_1 = V_2 = 5\text{V}$$

相关问题：如果在图 9-25 中将 100pF 电容器与 C_1和 C_2并联，试问 C_T是多少？

通用公式　在实际电路中有些情况下会出现两个以上电容器的并联。有些工厂根据负载情况需将一些并联电容器切换到电路中，出于这个原因，我们应该知道电容器并联的通用公式。式（9-10）可以推广到到任意个电容器并联，如图 9-26 所示。推广的计算公式如下，下标 n 可以是任意正整数。

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n \tag{9-11}$$

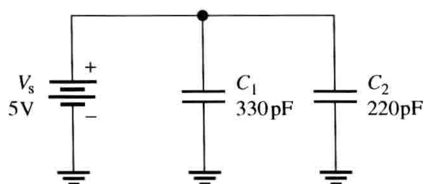


图 9-25

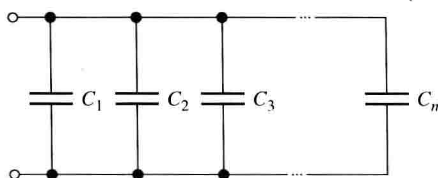


图 9-26 n 个电容器并联的一般电路

【例 9-9】 确定图 9-27 所示的 C_T。

解： $C_T = C_1 + C_2 + C_3 = 0.01\mu F + 0.022\mu F + 0.01\mu F = 0.042\mu F$

相关问题：如果在图 9-27 所示的电路中添加一个 0.01μF 并联电容，试问 C_T 是多少？

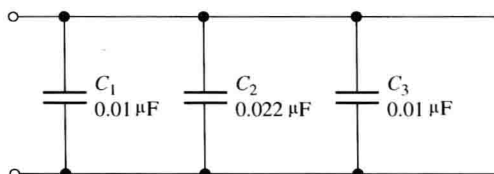


图 9-27

本节测试题

1. 试问怎样确定并联总电容？
2. 某个应用中需要 0.05μF 电容，而手边只有大量 0.01μF 的电容，试问如何才能得到所需的总电容？
3. 如果电容 10pF、56pF、33pF 和 68pF 并联，试问 C_T 是多少？

9.5 直流电路中的电容器

当电容器连接到直流电压源时，电容器将充电。根据电路中电容量和电阻值，电容器极板间按照可预测的方式积累电荷。

学习完本节内容，应该能够

- 描述电容器在直流开关电路中的工作原理；
- 描述电容器的充电与放电；
- 定义 RC 时间常数；
- 说明时间常数与充电、放电关系；
- 写出充电与放电曲线的关系式；
- 解释电容器隔离恒定直流的原因。

9.5.1 电容器充电

当电容器接到直流电压源上时将充电，如图 9-28 所示。图 9-28a 中电容器未充电，即极板 A 和极板 B 具有等量的自由电子。当开关闭合时，如 9-28b 所示，电源通过电路按箭头所示将电子从极板 A 搬运到极板 B。随着极板 A 失去电子和极板 B 得到电子，相对于极板 B 极板 A 变为正极，随着这个充电过程的继续，极板之间快速建立起电压，直至等于电源电压 V_S，但方向相反，如图 9-28c 所示。当电容器充满电时，就没有电流了。电容器阻断恒定直流。

把充了电的电容器从电源上断开，如图 9-28d 所示，根据其泄漏电阻的大小，电容器将保持电荷很长一段时间。电解电容器通常比其他电容器泄漏电荷快得多。

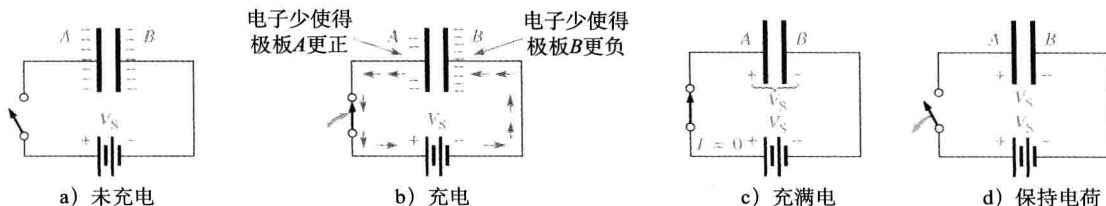


图 9-28 电容充电

9.5.2 电容器放电

当一个导体跨接在已充电电容器两端时，如图 9-29 所示，电容器将放电。在这种特定情况下，用开关在电容器两端接通一个低电阻的路径（导体），开关闭合前，电容器充电到 50V，如图 9-29a 所示。开关闭合后，如图 9-29b 所示，极板 B 上多余电子通过导体移动到极板 A（按箭头所示）。作为电流通过低电阻导体的结果，存储在电容器中的能量消耗在导体电阻上。当两极板的自由电子数目再次相等时，电荷被中和。此时，电容器两端的电压为零，电容器完全放电，如图 9-29c 所示。

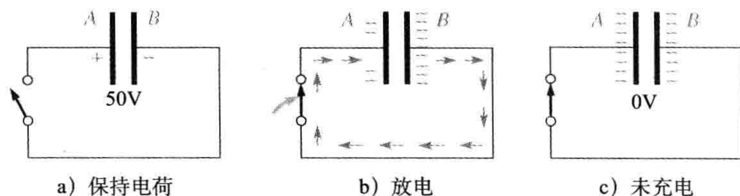


图 9-29 电容器放电

9.5.3 充、放电电压与电流

注意，在图 9-28 和图 9-29 中，放电期间电子流动的方向与充电期间方向相反。理解这一点很重要，理想情况下，充电和放电期间没有电流通过电容器的电介质，因为电介质是绝缘的，从一个极板到另一个极板的电流只能通过外部电路。

图 9-30a 显示了和电阻串联的电容器经开关接到电压源上。最初开关断开，电容器未充电，两端电压为零。开关闭合瞬间，电流跳变到最大值，电容器开始充电。由于电容器电压为零等效为短路，因此初始的充电电流最大，这样电流仅受电阻的限制。随着时间的推移和电容器的充电，电容器两端电压（V_C）逐步增大而充电电流逐步减小，充电期间电阻上的电压与电流成正比。

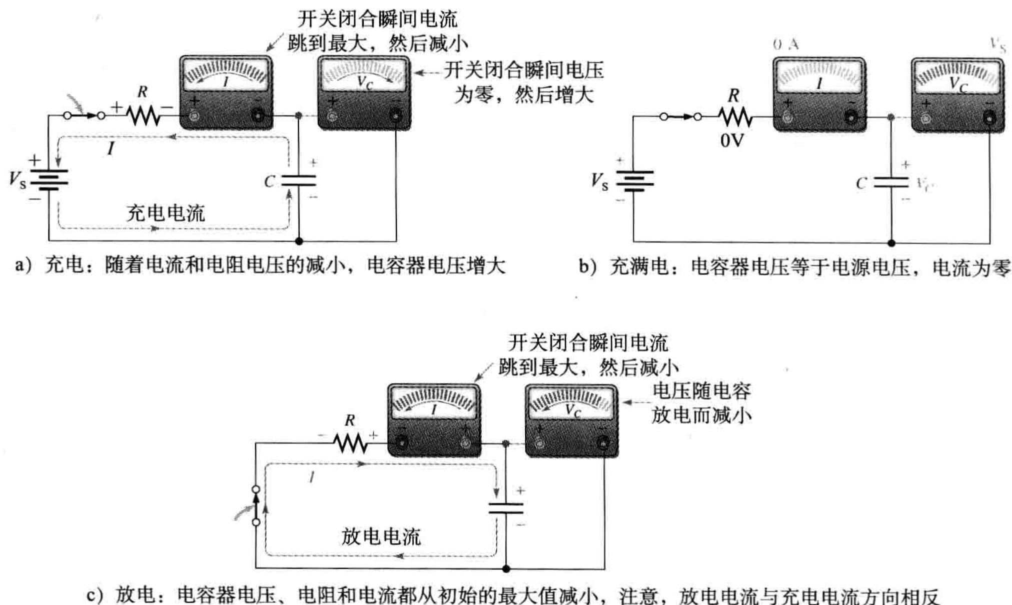


图 9-30 在电容器充电和放电期间的电压和电流

经过一段时间，电容器充满电，这时，电流为零，而电容电压等于电源电压，如图 9-30b 所示。如果此时断开开关，电容器将保持其充满电的电荷（忽略漏电）。

在图 9-30c 中，撤除电压源，开关闭合，电容器开始放电，开始时电流跳到最大值但方向与充电时相反。随着时间推移，电流和电容器电压都下降，电阻电压总是与电流成正比。当电容器完全放电时，电流和电容电压均为零。

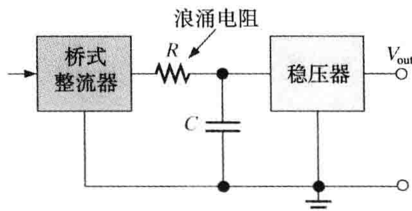
记住关于直流电路中电容器的两条准则：

1. 对于恒定电压，电容器表现为开路。
2. 对于电压的瞬时变化，电容器表现为短路。

安全提示 电源切断后电容器能够存储电荷很长一段时间，因此触摸或处理电路内外的电容器时要小心，如果接触电容器的引线，电容器可能会通过人体放电而产生电击！最好的做法是在处理电容器前使用带绝缘手柄短路工具对电容器放电。

系统注释：浪涌电阻

用于电子系统的典型小功率电源使用桥式整流器将交流转换为脉动直流，然后用滤波电容器对脉冲进行平滑并稳压以提供恒定的直流输出。许多时候我们会发现在整流器和稳压器之间有一个小电阻，这个电阻限制了电源第一次接通时流向电容器的浪涌电流。通常电容器容量很大，初始未充电时充电电流会很高，通过限制充电电流，浪涌电阻可防止熔丝熔断或断路器跳闸。



9.5.4 *RC* 时间常数

实际情况下，在电路中电容不可能没有电阻，它可能仅仅是小的引线电阻，或者可能是设计进去的电阻。正因为如此，电容器的充电和放电特性必须始终要包括与之串联的电阻，该电阻在电容器的充电和放电中引入了时间元素。

当电容器通过电阻充电或放电时，需要一定时间才能完全充电或完全放电。由于电荷从一点移动到另一点需要有限的时间，因此电容两端的电压不能瞬时变化。*RC* 串联电路的时间常数决定了电容器充电或放电的速度。

RC 时间常数是一个固定的时间间隔，等于 *RC* 串联电路的电阻与电容的乘积。

当电阻以欧姆为单位、电容以法拉为单位时，时间常数以秒为单位，用希腊字母符号 τ 表示，公式为

$$\tau = RC \tag{9-12}$$

回顾 $I=Q/t$，电流取决于给定时间内移动的电荷量，电阻增大时充电电流减小，因而电容器充电的时间增长。当电容增大时电荷量增大，因而同样电流电容器充电的时间增长。

【例 9-10】 *RC* 串联电路的电阻为 1.0MΩ，电容为 4.7μF，试问时间常数为多少？

解： $\tau = RC = 1.0 \times 10^6 \Omega \times 4.7 \times 10^{-6} \mathrm{F} = 4.7\mathrm{s}$

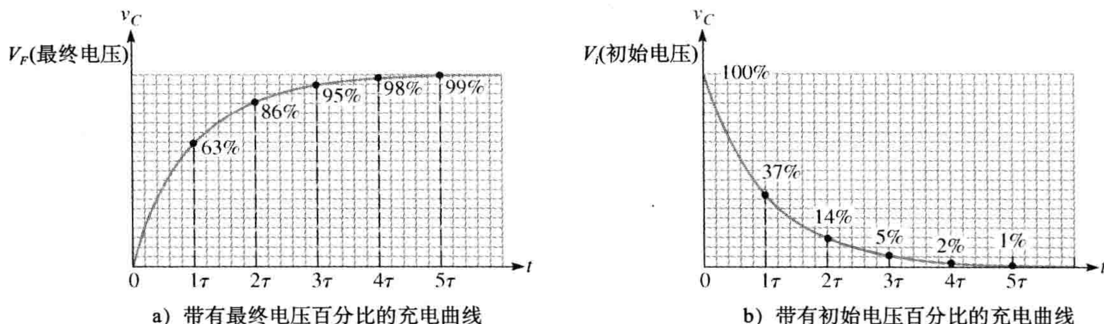
相关问题：*RC* 串联电路具有 270kΩ 电阻和 3300pF 电容，试问时间常数为多少 μs？

当电容器在两个电平之间充电或放电时，在第一个时间常数内电容器上电荷改变量大约为两个电平下电荷差的 63%，未充电电容器在第一个时间常数内大约充电到充满电时的 63%，而充满电的电容器放电的第一个时间常数内电压大约下降到初始电压的 100%－63%＝37%，变化量同样对应 63%。

9.5.5 充、放电曲线

电容器沿一条非线性曲线充电或放电，如图 9-31 所示。图 9-31 显示了每一时间常数间隔

内的大致满电荷百分比，这种曲线服从精确的数学公式，称为指数曲线。充电曲线呈指数增大，放电曲线呈指数衰减。经过5个时间常数即可达到最终电压的99%（被认为达到了100%）。5个时间常数间隔被普遍接受为电容器完全充电或放电的时间，称为瞬态时间。



a）带有最终电压百分比的充电曲线　　b）带有初始电压百分比的充电曲线

图9-31　*RC*电路中电容器充放电指数电压曲线

通用公式　下面的公式给出了瞬时电压和电流指数增大或减小曲线的一般表达式：

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau} \tag{9-13}$$

$$i = I_F + (I_i - I_F)e^{-t/\tau} \tag{9-14}$$

其中，V_F和I_F为最终电压和电流值，V_i和I_i为初始电压和电流值。小写斜体字母v和i表示时刻t的电容器电压和电流的瞬时值，e表示自然对数的基数。在计算器上e^x键可以方便地计算指数项。

从零开始充电　式（9-15）给出图9-31a所示指数增大电压从零电压（$V_i=0$）开始的特殊情况的曲线表达式。从通用公式（9-13）开始，推导过程如下。

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau} = V_F + (0 - V_F)e^{-t/RC} = V_F - V_F e^{-t/RC}$$

提取出V_F，得到

$$v = V_F(1 - e^{-t/RC}) \tag{9-15}$$

如果初始未充电，则利用式（9-15）可以计算任意时刻电容的充电电压值。在式（9-15）中用i替换v、I_F替换V_F，则可以计算充电电流值。

【例9-11】　在图9-32中，如果电容器初始未充电，试求开关闭合50μs后的电容器电压，并画出充电曲线。

解：时间常数为

$$\tau = RC = 8.2\text{k}\Omega \times 0.01\mu\text{F} = 82\mu\text{s}$$

电容器充满电的电压为50V（即V_F），初始电压为零，注意，50μs小于一个时间常数，所以这段时间电容充电电压小于满电压的63%。

$$v_C = V_F(1 - e^{-t/RC}) = 50\text{V} \times 1 - e^{-50\mu s/82\mu s}) = 22.8\text{V}$$

电容器的充电曲线如图9-33所示。

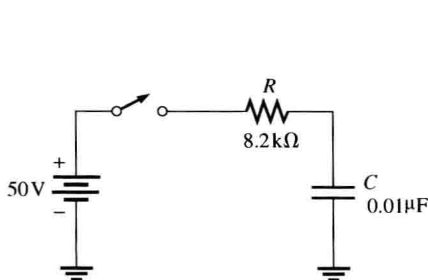


图　9-32

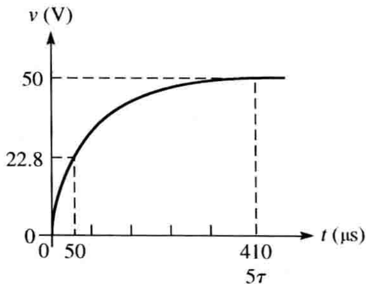


图　9-33

相关问题：求图 9-32 中开关闭合 15μs 后的电容器电压。

放电到零 图 9-31b 所示的特殊情况是指数衰减电压曲线最终到零电压（$V_F=0$），从通用式（9-13）推导该情况的表达式如下：

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau} = 0 + (V_i - 0)e^{-t/RC}$$

简化为

$$v = V_i\,e^{-t/RC} \tag{9-16}$$

其中，V_i为放电开始的电压值。利用式（9-16）可以计算任意时刻的放电电压值，指数$-t/RC$也可以写成$-t/\tau$。

【例 9-12】 求图 9-34 开关闭合 6ms 后的电容器电压，并画出放电曲线。

解：放电时间常数为

$$\tau = RC = 10\text{k}\Omega \times 2.2\mu\text{F} = 22\text{ms}$$

电容器初始电压为 10V，注意，6ms 小于一个时间常数，所以电容器放电小于 63%。因此，6ms 时的电压将大于初始电压的 37%。

$$v_C = V_i e^{-t/RC} = 10\text{V} \times e^{-6\text{ms}/22\text{ms}} = 7.61\text{V}$$

电容器的放电曲线如图 9-35 所示。

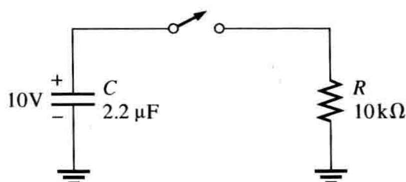


图 9-34

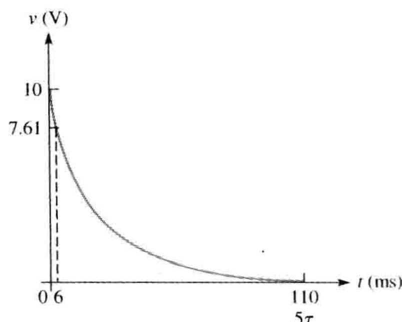


图 9-35

相关问题：在图 9-34 中，将 R 改成 2.2kΩ，试求开关闭合 1ms 后的电容器电压。

利用通用指数曲线的图解方法 图 9-36 的通用曲线提供了电容充、放电的图形解，例 9-13 演示了该图解方法。

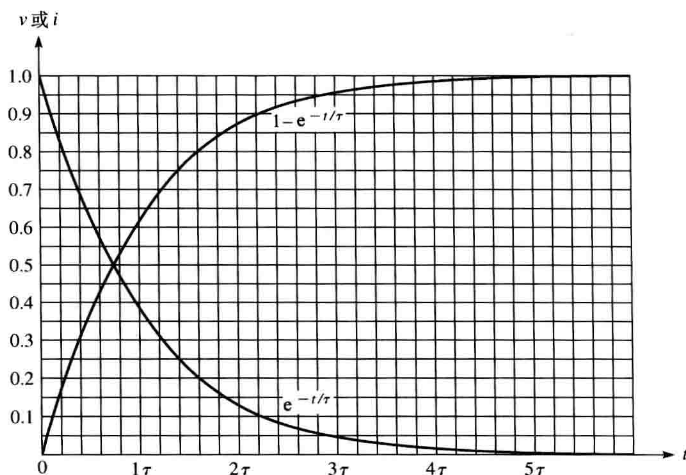


图 9-36 归一化通用指数曲线

【例9-13】 试问图9-37中电容器充电到75V需要多长时间？开关闭合2ms后的电容器电压是多少？利用图9-36的归一化通用曲线求解。

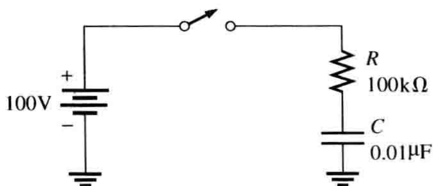


图 9-37

解： 最终电压为100V，对应图上100%电平(1.0)，75V是最大值的75%，对应图9-37上的0.75。可以看到该值出现在1.4倍时间常数处，本例电路中一个时间常数为$RC=100\text{k}\Omega\times0.01\mu\text{F}=1\text{ms}$，因此，在开关闭合1.4个时间常数后电容器电压达到75V。

2ms时电容电压大约在86V（纵轴的0.86），本例图解如图9-38所示。

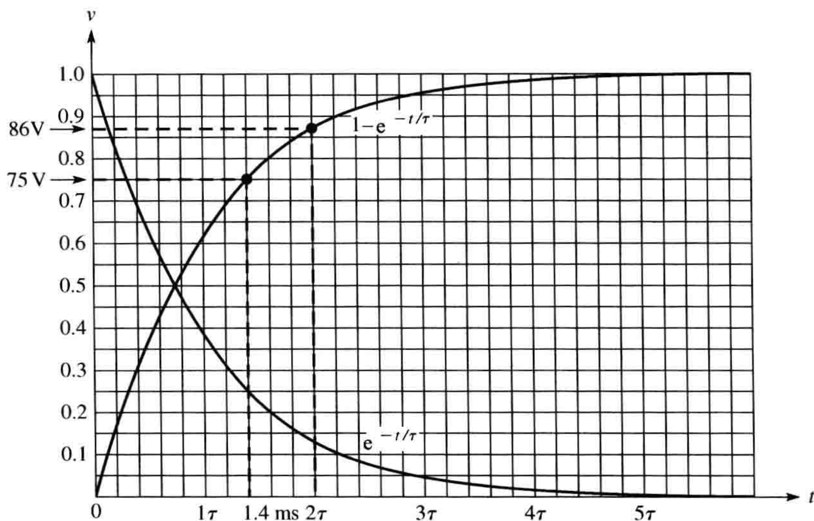


图 9-38

相关问题：利用归一化通用指数曲线，求图9-37中电容器从零充电到50V所需的时间，试问开关闭合3ms后的电容器电压是多少？

9.5.6 对方波的响应

当我们用一个周期大于时间常数的方波驱动RC电路时，就会发生指数上升和下降的常见状况，方波提供了类似开关的动作，但又不像单开关，当波形下降到零时还提供了经过信号发生器的放电通路。

当方波上升时，电容器两端电压随时间向方波的最大值指数上升，快慢由时间常数决定。当方波回到零电平时，电容器电压指数下降，下降快慢还是由时间常数决定。方波发生器的内阻是RC时间常数的一部分，然而，如果内阻与R相比很小，可以忽略。下面的例子显示了周期比时间常数长时的波形，其他情况将在第15章详细介绍。

【例9-14】 图9-39a所示电路中假设信号发生器内阻可以忽略，对应图9-39b所示输入波形的一个完整周期，计算每0.1ms电容器两端的电压。

解：

$$\tau=RC=15\text{k}\Omega\times0.0056\mu\text{F}=0.084\text{ms}$$

方波的周期为1ms，约等于12τ，这意味着脉冲每次改变都要经过6τ，能够让电容完全充电或放电。

对于上升指数

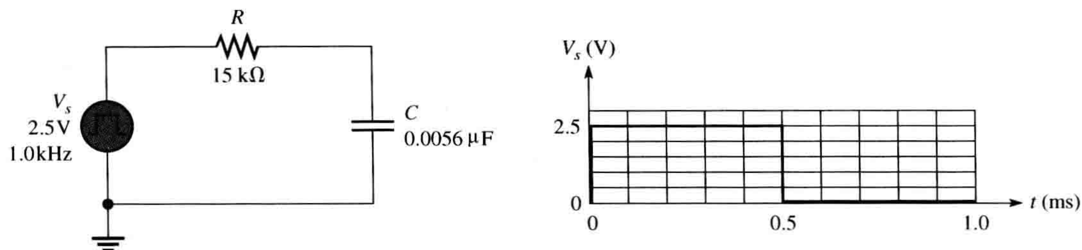


图 9-39

$$v = V_F(1 - e^{-t/RC}) = V_F(1 - e^{-t/\tau})$$

在 0.1ms 时：$v = 2.5V \times (1 - e^{-0.1ms/0.084ms}) = 1.74V$

在 0.2ms 时：$v = 2.5V \times (1 - e^{-0.2ms/0.084ms}) = 2.27V$

在 0.3ms 时：$v = 2.5V \times (1 - e^{-0.3ms/0.084ms}) = 2.43V$

在 0.4ms 时：$v = 2.5V \times (1 - e^{-0.4ms/0.084ms}) = 2.48V$

在 0.5ms 时：$v = 2.5V \times (1 - e^{-0.5ms/0.084ms}) = 2.49V$

对于下降指数

$$v = V_i e^{-t/RC} = V_i e^{-t/\tau}$$

在这个表达式中，时间是从变化发生时算起(要从实际时间减去 0.5ms)，例如，在 0.6ms 时，t = 0.6ms−0.5ms =0.1ms。

在 0.6ms 时：$v = 2.5e^{-0.1ms/0.084ms} = 0.76V$

在 0.7ms 时：$v = 2.5e^{-0.2ms/0.084ms} = 0.23V$

在 0.8ms 时：$v = 2.5e^{-0.3ms/0.084ms} = 0.07V$

在 0.9ms 时：$v = 2.5e^{-0.4ms/0.084ms} = 0.02V$

在 1.0ms 时：$v = 2.5e^{-0.5ms/0.084ms} = 0.01V$

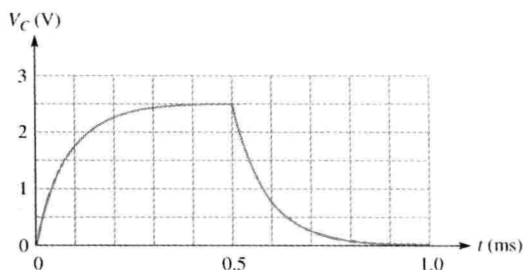


图 9-40

图 9-40 给出了结果波形图。

相关问题：试问 0.65ms 时电容器电压是多少？

本节测试题

1. 当 $R = 1.2k\Omega$、$C = 1000pF$ 时，求时间常数。
2. 如果问题 1 中电路由 5V 电源充电，初始未充电的电容器充满电需要多长时间？充满电时电容器电压是多少？
3. 某电路时间常数为 1ms，如果由 10V 电池充电，试问在 2ms、3ms、4ms 和 5ms 时电压值是多少？假设电容器初始未充电。
4. 电容器充电到 100V，如果通过电阻放电，试问在一个时间常数时电容器电压是多少？

9.6 交流电路中的电容器

我们知道电容器能够隔离恒定直流，电容器通过交流时具有一定的阻力，称为容抗，容抗取决于交流频率。

学习完本节内容，应该能够

- 描述电容器在交流电路中的工作原理；
- 定义容抗；
- 在给定电路中确定容抗值；

- 计算串联和并联电容器的电容量；
- 解释为什么电容器引起电压与电流之间的相位差；
- 讨论电容器的瞬时、有功、无功功率。

9.6.1 容抗

在图 9-41 显示一个电容器接到正弦电压源上。当电源电压保持振幅不变而提高频率时，电流的振幅增大。同样，当电源频率降低时，电流的振幅减小。

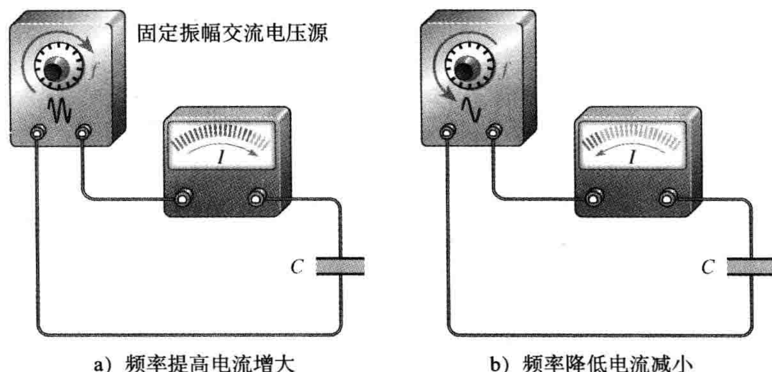


图 9-41 电容电路的电流与电源电压频率成正比

当电压的频率提高时，电压的变化率同样提高，这一关系如图 9-42 所示，其中频率加倍。现在如果电压变化的速率提高，则在给定时间通过电路移动的电荷量增大，给定时间内电荷量增大意味着电流大。例如，频率增大 10 倍表示在给定时间间隔内电容器充电和放电快 10 倍，电荷移动速率增大 10 倍，这意味着电流增大 10 倍，因为 $I=Q/t$。

电压振幅固定时电流增大表明对电流的阻碍减小，因此，电容器提供对电流的阻碍，而这个阻碍与频率成反比。

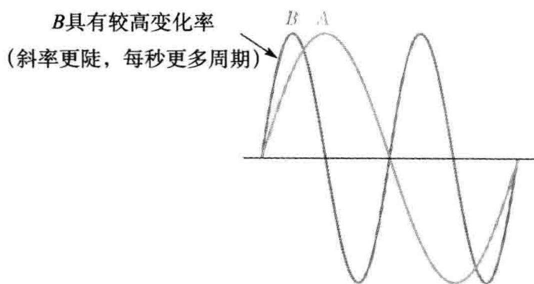


图 9-42 频率提高时正弦波的变化率增大

电容器对正弦电流的阻碍称为容抗。容抗的符号是 X_C，单位是欧姆（Ω）。

我们看到频率影响电容对电流的阻碍（容抗），现在来看电容量对容抗的影响，图 9-43a 显示固定振幅和频率的正弦电压加到 1μF 电容器上，存在一定量的交流电流。当电容值增大到 2μF 时，电流增大，如图 9-43b 所示，所以，电容量增大，对电流的阻碍（容抗）减小，因此，容抗不仅与频率成反比，而且与电容量成反比。这一关系表述如下：

$$X_C \text{与} \frac{1}{fC} \text{成正比}$$

可以证明，X_C对 $1/fC$ 的比例常数是 $1/2\pi$，因此，容抗（X_C）的公式为

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \tag{9-17}$$

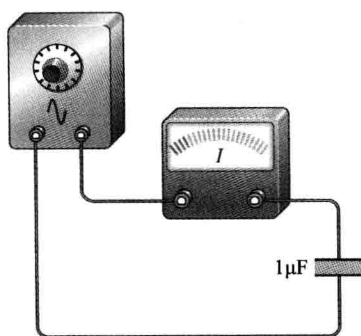
X_C的单位为欧姆，f 的单位为赫兹，C 的单位为法拉，2π 项源于第 8 章中用旋转运动描述正弦波，旋转一周为 2π 弧度。

【例 9-15】 正弦电压如图 9-44 所示加在电容器上，正弦波频率为 1.0kHz，求容抗。

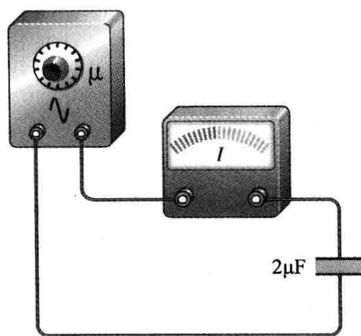
解：

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 1.0 \times 10^3\,\text{Hz} \times 0.0047 \times 10^{-6}\,\text{F}} = 33.9\text{k}\Omega$$

相关问题：在图 9-44 中，求使容抗等于 10kΩ 所需的频率。



a) 小电容电流小



b) 大电容电流大

图 9-43　固定振幅和频率电流随电容值变化

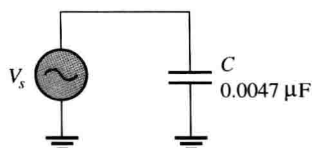


图　9-44

9.6.2　串联电容器的容抗

交流电路中串联电容器的总电容量小于各个串联电容，由于总电容小了，因此总的容抗（阻碍电流）比任意串联电容的容抗都大。串联电容器的总容抗（$X_{C(\text{tot})}$）等于各个串联容抗之和。

$$X_{C(\text{tot})} = X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} + \cdots + X_{Cn} \tag{9-18}$$

比较计算串联电阻器总电阻的公式（4-1），两种情况下都是简单地把各个阻碍相加。

9.6.3　并联电容器的容抗

交流电路中并联电容器的总电容量等于各个串联电容之和，回顾容抗反比于电容量，由于并联总电容量大于任意并联电容，因此总容抗一定小于任意并联电容的容抗。并联电容器的总容抗由下式求得

$$X_{C(\text{tot})} = \frac{1}{\dfrac{1}{X_{C1}} + \dfrac{1}{X_{C2}} + \dfrac{1}{X_{C3}} + \cdots + \dfrac{1}{X_{Cn}}} \tag{9-19}$$

比较计算并联电阻器总电阻的公式（5-1），在并联电阻的情况，总的阻碍（电阻或电抗）是各个阻碍倒数之和的倒数。

对于两个电容器并联的情况，公式（9-9）能够简化为积除以和的形式，这一形式很实用，因为多个电容器并联的情况不常见。

$$X_{C(\text{tot})} = \frac{X_{C1}X_{C2}}{X_{C1} + X_{C2}}$$

【例 9-16】 图 9-45 中各个电路的总容抗是多少？

解： 两个电路中各个电容器的容抗相同

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi fC_1} = \frac{1}{2\pi \times 5.0\text{kHz} \times 0.01\mu\text{F}} = 3.18\text{k}\Omega$$

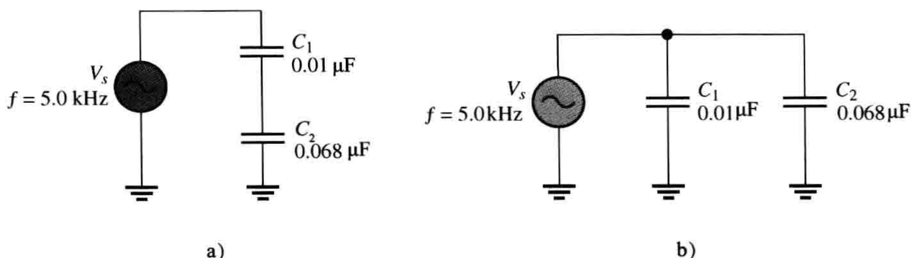


图 9-45

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1}{2\pi \times 5.0\text{kHz} \times 0.068\mu\text{F}} = 468\Omega$$

串联电路：对于图9-45a所示的串联电容器，总容抗为X_{C1}和X_{C2}之和，如公式（9-18）给定。

$$X_{C(\text{tot})} = X_{C1} + X_{C2} = 3.18\text{k}\Omega + 468\Omega = 3.65\text{k}\Omega$$

或者可以用公式（9-7）先求总电容。然后代入公式（9-17）来计算总电抗。

$$C_{\text{tot}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{0.01\mu\text{F} \times 0.068\mu\text{F}}{0.01\mu\text{F} + 0.068\mu\text{F}} = 0.008\,7\mu\text{F}$$

$$X_{C(\text{tot})} = \frac{1}{2\pi f C_{\text{tot}}} = \frac{1}{2\pi \times 5.0\text{kHz} \times 0.0087\mu\text{F}} = 3.65\text{k}\Omega$$

并联电路：对于图9-45b所示的并联电容器，从X_{C1}和X_{C2}的积除以和法则确定总容抗。

$$X_{C(\text{tot})} = \frac{X_{C1} X_{C2}}{X_{C1} + X_{C2}} = \frac{3.18\text{k}\Omega \times 468\Omega}{3.18\text{k}\Omega + 468\Omega} = 408\Omega$$

相关问题：通过先求总电容的方式求并联电路的总容抗。

欧姆定律 电容器的容抗类似于电阻器的电阻，事实上，两种都表达成欧姆。由于R和X_C都是对电流的阻碍，因此欧姆定律既可应用于电阻电路也可应用于电容电路。

$$I = \frac{V}{X_C} \tag{9-20}$$

在交流电路中应用欧姆定律时，电压和电流的表示必须一致，即都用有效值或都用峰值，依次类推。

【例9-17】 求图9-46中的电流有效值。

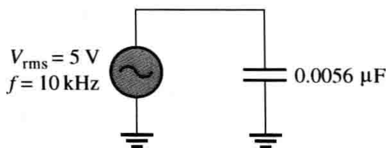


图 9-46

解： 首先求X_C

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3\,\text{Hz} \times 0.0056 \times 10^{-6}\,\text{F}} = 2.84\text{k}\Omega$$

然后应用欧姆定律

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{X_C} = \frac{5\text{V}}{2.84\text{k}\Omega} = 1.76\text{mA}$$

相关问题：将图9-46的频率改为25kHz，再求电流的有效值。

Multisim 仿真

打开Multisim仿真文件E09-17，测量电流有效值并与计算值比较。将电源频率改为25kHz，再测量电流。

9.6.4 电容分压器

在交流电路中，电容器可以用做分压器。串联电容器两端电压由式（9-9）给定，此处再重复一遍。

$$V_x = \left(\frac{C_{\text{tot}}}{C_x}\right) V_S$$

电阻分压器用电阻比表示，即阻碍的比率。我们可以考虑把电阻分压器的思想应用到电容分压器，用容抗替代电阻。电容分压器电容器两端电压的公式可表示为

$$V_x = \left(\frac{X_{Cx}}{X_{C(tot)}}\right)V_S \tag{9-21}$$

式中，X_{Cx}为电容C_x的容抗，$X_{C(tot)}$为总容抗，V_x为电容器C_x两端的电压，与公式（4-5）对应。公式（9-9）和公式（9-21）都能用于求解分压器电压，如下面的例子所示。

【例 9-18】 试问图 9-47 电路中电容器C_2两端的电压是多少？

解：各个电容器的容抗和总容抗已在例 9-16 中确定，代入到公式（9-21）。

$$V_2 = \left(\frac{X_{C2}}{X_{C(tot)}}\right)V_S = \frac{468\Omega}{3.65\text{k}\Omega} \times 10\text{V} = 1.28\text{V}$$

注意，大电容器两端电压占总电压比例较小。我们也可以从公式（9-9）得到同样结果：

$$V_2 = \left(\frac{C_{tot}}{C_2}\right)V_S = \frac{0.0087\mu\text{F}}{0.068\mu\text{F}} \times 10\text{V} = 1.28\text{V}$$

相关问题：利用公式（9-21）求C_1两端的电压。

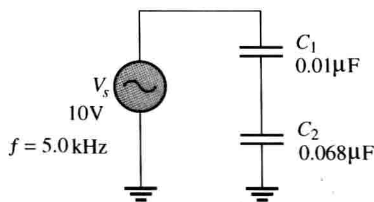


图 9-47

9.6.5 电流超前于电压 90°

正弦电压如图 9-48 所示，注意，电压变化的速率沿正弦波曲线变化，记为曲线的“陡度”。过零点处的变化速度比曲线其他任何地方都快。而在峰值处曲线的变化速率为零，这一点刚刚达到最大值并改变方向。

电容器存储的电荷量决定其两端的电压，因此，电荷从一个极板向另一个极板转移的速率（$Q/t=I$）决定电压的变化率。当电流以最大速率变化（在过零点）时，电压达到最大值（峰值），而当电流以最小速率变化（峰值处的零速率）时，电压达最小值（零）。这一相位关系如图 9-49 所示。我们看到，电流峰值出现在电压峰值前 1/4 周期处，因此说电流超前于电压 90°。

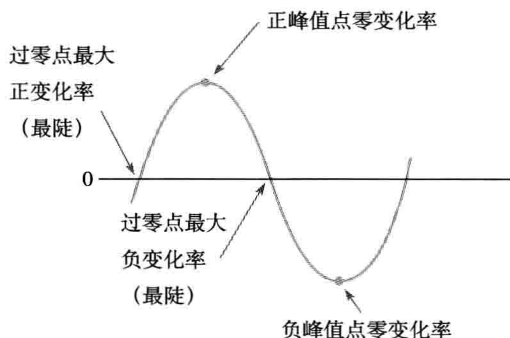


图 9-48 正弦波的变化率

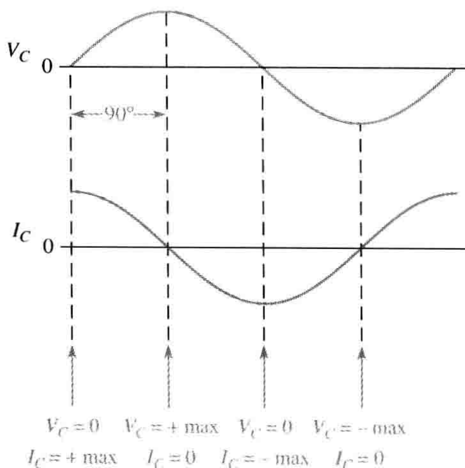


图 9-49 电流总是超前于电压 90°

9.6.6 电容器的功率

正如本章前面的讨论，充电电容器将能量存储在电介质的电场中，理想电容器不消耗能

量，而仅仅临时存储能量。当给电容器加电压时，电压的第一个1/4周期存储能量，然后在第二个1/4周期存储的能量返回给电源，没有净能量的损失。图9-50显示了电容器电压和电流一个周期的功率曲线。

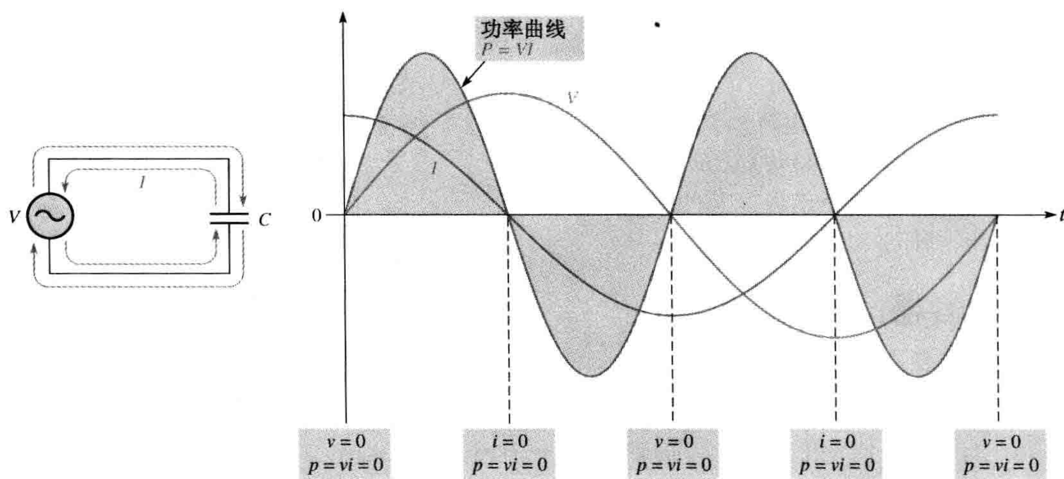


图9-50 电容器的功率曲线

瞬时功率（P） 由瞬时电压v和瞬时电流i的乘积得到瞬时功率p，在v或i为零的点，p同样为零；当v和i均为正时，p为正；当v或i为正另一个为负时，p为负；当v和i均为负时，p为正。我们看到，功率也服从正弦曲线，功率的正值表示电容器在存储能量，而功率的负值则表示从电容器向电源返还能量。注意，功率波动的频率是电压或电流频率的两倍，能量交替地存储和返回给电源。

有功功率（P_{true}） 理想情况，电容器在功率正半周期存储的所有能量将在其负半周期全部返还给电源，没有因在电容器中转化为热而造成的净能量损失，所以，有功功率为零。实际上，由于泄漏和实际电容器的极板电阻，总功率中有小部分以有功功率形式耗散掉。

无功功率（P_r） 电容器存储和返还能量的速率称为无功功率P_r，由于任意时刻，电容器都在存储或返还能量，因此无功功率是一个非零的量，无功功率并不代表能量损失。可用下面的式子表示：

$$P_r = V_{rms} I_{rms} \tag{9-22}$$

$$P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_C} \tag{9-23}$$

$$P_r = I_{rms}^2 X_C \tag{9-24}$$

注意，上面的式子与第3章介绍的电阻器有功功率形式相同，电压和电流用有效值表示，无功功率的单位是乏（var）。

【例9-19】 求图9-51中的有功功率和无功功率。

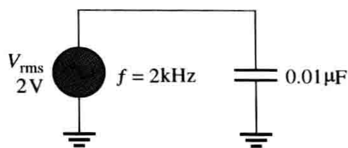


图 9-51

解： 对于理想电容器，有功功率为零。先求电容器的容抗，然后利用公式（9-23）求无功功率。

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 2 \times 10^3\,\text{Hz} \times 0.01 \times 10^{-6}\,\text{F}} = 7.96\text{k}\Omega$$

$$P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_C} = \frac{(2\text{V})^2}{7.96\text{k}\Omega} = 503 \times 10^{-6}\,\text{VAR} = 503\ \mu\text{VAR}$$

相关问题：如果图 9-51 中频率加倍，试问有功功率和无功功率是多少？

本节测试题

1. 对于 $f=5\text{kHz}$、$C=47\mu\text{F}$，计算 X_C。
2. 试问在什么频率 0.1μF 电容器的容抗等于 2kΩ？
3. 计算图 9-52 中的有效电流。
4. 试说明电容器中电压和电流之间的关系。
5. 将 1μF 电容器接到有效值 12V 的交流电压源上，试问有功功率是多少？

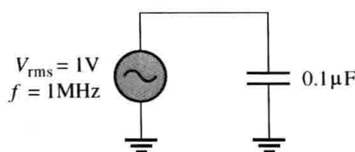


图　9-52

9.7　电容器的应用

电容器广泛应用于电子与电气系统中。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论电容器的应用；
- 描述电源滤波器；
- 解释耦合与旁路电容器；
- 讨论电容器应用于调谐电路、定时电路、计算机存储器的基础知识。

拿起任意一块电路板，打开任意一个电源，看看任意一个电子仪器内部，都能够发现一种或多种电容器，这些元件在直流和交流系统中发挥着各种作用。

9.7.1　电气存储

电容器最基本的应用之一是作为小功率电路的电压源备份，例如，某些类型的计算机半导体存储器。这种特殊的应用需要非常高的电容值，且泄漏可以忽略不计。

存储电容器连接在电路的直流电源输入和接地之间，当电路处于常规电源供电的工作状态时，电容器维持在完全充电到直流电源电压状态。如果常规电源中断，电路失去电源，这时存储电容器临时成为电路的电源。

只要其保持有足够的电荷量，电容器就能给对电路提供电压和电流。随着电路中电流的吸取，电荷从电容器移去，电压降低，因此，存储电容器只能用做临时的电源。电容器能向电路提供足够功率的时间长短取决于电容量和电路吸取电流的大小。电流越小且电容量越大，电容器可以给电路提供功率的时间就越长。

9.7.2　电源滤波

一个基本的直流电源由整流器后接滤波器构成。整流器将从市电获得的 60Hz、120V 正弦电压转换成脉动直流电压，根据整流器的类型脉动电压可以是半波整流电压或全波整流电压。图 9-53a 所示的半波整流器把正弦电压的每个负半周都去掉，图 9-53b 所示的全波整流器则自动地把每个负半周变换极性。半波和全波整流电压都是直流，尽管电压有变化但不改变极性。

要能够为电子电路供电，整流后的电压必须变成恒定的直流电压，因为所有电路都需要恒定电源。在整流器的输出端接上滤波器，几乎可以消除整流后电压的波动，为负载提供平滑的直流电压。滤波器是一个电子电路，如图 9-54 所示。

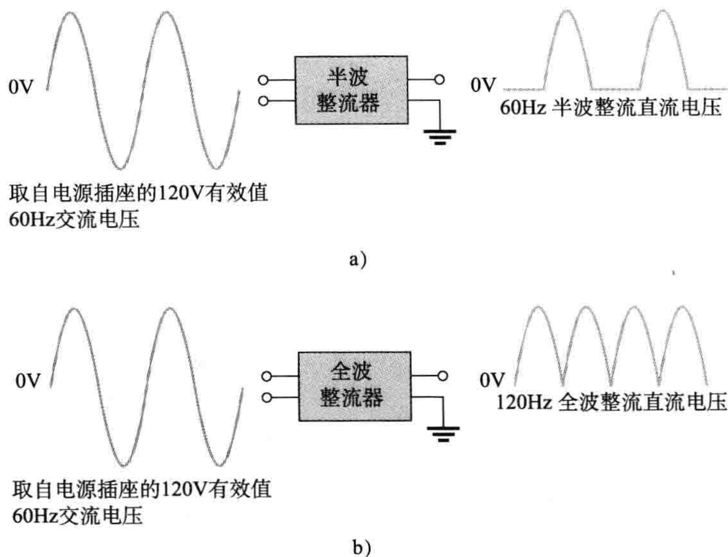


图 9-53　半波和全波整流器的工作原理

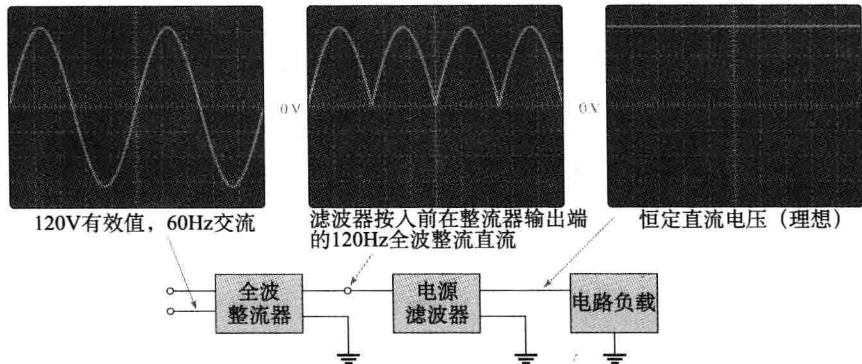


图 9-54　直流电源的框图与工作原理

电容器作为电源滤波器　由于电容器具有存储电荷的能力，因此可用做直流电源的滤波器。图 9-55a 显示了一个采用全波整流器和电容滤波器的直流电源。从充电和放电的角度来看，其工作过程如下：假设电容器最初不带电荷，第一次打开电源时，出现整流后电压的第一个周期，电容器通过整流器的低电阻快速充电，电容器上的电压跟随整流后的电压曲线达到整流电压的峰值；整流后电压通过峰值后开始降低，电容器将通过高电阻的负载电路开始非常缓慢地放电，如图 9-55b 所示。放电量通常很小，为了说明清楚，图 9-55b 中做了夸大。在整流后的电压下一个周期，电容器将通过再次充电补充丢失的少量电荷回到峰值。只要电源开启，这种少量充电和放电模式将一直继续。

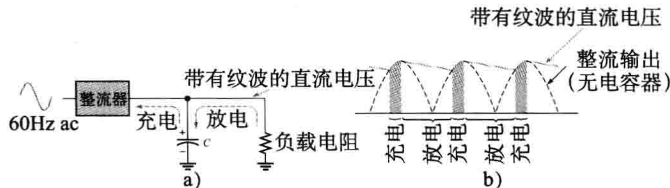


图 9-55　电源滤波电容器的工作原理

整流器设计成只允许电容器充电电流流过，因此，电容器不会反过来通过整流器放电，只能通过电阻值相对较高的负载少量放电。由于电容器的充电和放电引起的电压的小波动称为纹波电压。好的直流电源输出纹波非常小。电源滤波电容器的放电时间常数取决于其电容值和负载电阻，因而，电容值越高，放电时间越长，纹波越小。

9.7.3　直流阻断和交流耦合

电容器通常在电路的一个部分到下一个部分之间用于阻断恒定的直流电压。一个例子是连接在两级放大器之间的电容器，用以防止第一级输出直流电压影响第二级输入端直流电压，如图9-56所示。假设正常工作时第一级输出直流电压为零，而第二级输入端有3V直流电压，电容器阻止第二级的3V直流电压影响第一级输出端的零直流电压，反之亦然。

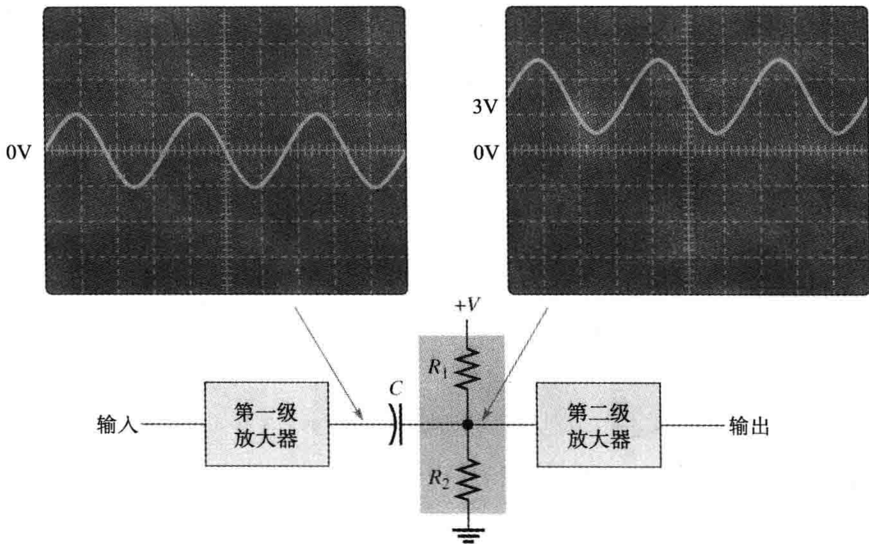


图9-56　放大器中电容器作阻断直流交流耦合的应用

如果正弦电压加到第一级输入端，信号电压增大（放大）并呈现在第一级输出端，如图9-56所示。然后放大的信号通过电容器耦合到第二级的输入端，与3V直流电压叠加，再经过第二级放大。为了使信号电压通过电容器不衰减，电容器必须足够大，以使在信号频率其容抗可以忽略。在此应用中，该电容器叫做耦合电容器，理想情况下，耦合电容对直流开路，对交流短路。当信号频率降低时，容抗增大，某些时候容抗变得足够大，引起交流电压在第一级和第二级之间的显著减小。

系统举例9-2　晶体管放大器

放大器构成许多电子系统的骨干，所有晶体管放大器都需要直流电压建立适当工作条件以放大交流信号。这些直流电压称为偏置电压，而交流信号则叠加在直流电压上面。图9-57显示了一

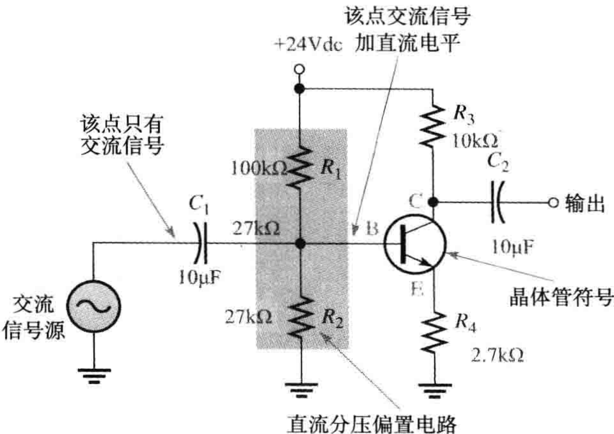


图9-57　分立晶体管放大器

个分立晶体管放大器，用两个耦合电容器将交流信号接入和送出放大器而不影响偏置电压。由 R_1 和 R_2 组成的分压器将24V直流电源的电压分压成输入偏置电压。

当交流信号电压加到放大器时，输入耦合电容 C_1 阻止交流电源影响直流偏置电压。如果没有电容，信号源内阻将与 R_2 并联，完全改变直流偏置电压值。选择的耦合电容应使容抗 X_C 在交流信号频率与偏置电阻值相比非常小，这样耦合电容能够有效地将交流信号从信号源耦合到放大器的输入端。在输入耦合电容器的信号源侧仅有交流信号，而在放大器侧则是交流信号加直流偏置电压。电容器 C_2 是输出耦合电容器，将放大的交流信号耦合到接输出端的下一级放大器，把晶体管的输出交流信号和直流电压隔离开来。

9.7.4 电源线去耦合

在电路板上，通过在直流电源电压线与接地之间接电容器，去耦由于快速开关数字电路引入的有害瞬态电压尖峰，防止其进入直流电源电压。电压瞬态包含较高的频率分量，可能会影响电路的工作。通过一个去耦电容的非常低容抗，这些瞬变短路到地。去耦电容器通常用在电路板上沿电源电压线的很多点，特别是在集成电路（IC）附近。

9.7.5 旁路

旁路电容器用来旁路电路中电阻周围的交流电压，而不影响电阻两端的直流电压，例如，在放大器电路中，各点都需要称为偏置电压的直流电压。为了使放大器正常工作，某些偏置电压必须保持恒定，因此，必须除去任何交流电压。从偏置点到地接一个足够大的电容器，为交流电压提供接地的低抗路径，在给定点留下恒定的直流偏置电压，该旁路应用如图9-58所示。随着频率的降低，旁路电容器的容抗增大，旁路效果变差。

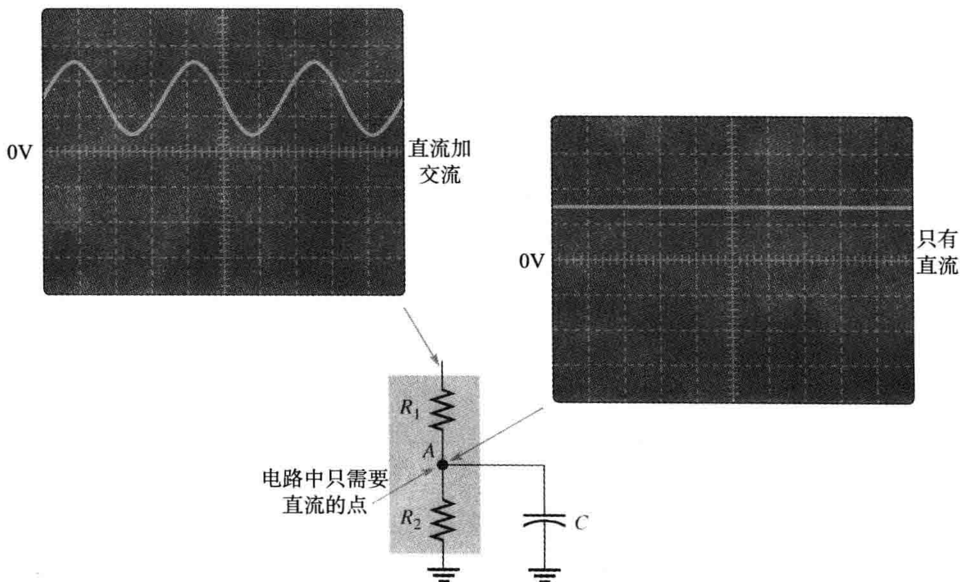


图9-58 旁路电容器的工作原理举例

9.7.6 信号滤波器

滤波器用于从含有众多不同频率、范围广泛的信号中选择某个特定频率的交流信号，或选

择某个频带而消除所有其他频率。这类滤波器常用在收音机和电视接收机中，这里需要选择从特定电台发送的信号并消除或过滤该地区所有其他电台发送的信号。

当我们调谐收音机或电视机时，实际上是在改变调谐电路（一种滤波器）中的电容，以使希望的电台或频道信号通过接收电路。在该滤波器中电容器与电阻、电感（见第 11 章）和其他元件配合使用。

滤波器的主要特性是频率选择性，其原理基于电容器的容抗取决于频率（$X_C=1/2\pi fC$）。

9.7.7 定时电路

电容器的另一个重要应用领域是定时电路。该定时电路产生指定的时间延迟，或产生具有特定特征的波形。回想一下，通过选择适当的 R 和 C 值，可以控制含有电容和电阻电路的时间常数，在各类型电路中，可以用电容器的充电时间作为基本的时间延迟，一个例子是控制汽车转向指示灯光定期闪烁的电路。

9.7.8 计算机存储器

动态计算机存储器使用电容器作为二进制信息的基本存储单元，二进制信息由 1 和 0 两个数字构成，充电电容器视为存储 1，而放电电容器视为存储 0，1 和 0 的二进制数据模式存储在由相连的电容器阵列存储器中，相关内容将在计算机或数字基础课程中介绍。

本节测试题

1. 说明滤波电容器如何对半波或全波整流直流电压进行平滑。
2. 说明耦合电容器的用途。
3. 耦合电容器必须多大？
4. 说明去耦电容的用途。
5. 讨论在诸如信号滤波器的频率选择电路中频率与容抗关系的重要性。

本章小结

- 电容器是一种能够存储电荷的电气元件，由称为电介质的绝缘材料分割的一个或多个导体构成。
- 电容器将电荷存储在其极板上。
- 能量通过带电极板在电介质中产生的电场存储在电容器中。
- 电容的度量单位是法拉（F）。
- 电容与极板面积和介电常数成正比，与极板之间的距离（电介质厚度）成反比。
- 介电常数是材料建立电场能力的指标。
- 介电强度是决定电容器击穿电压的一个因素。
- 电容器通常根据电介质材料分类，典型的材料有云母、陶瓷、塑料薄膜、电解质（铝氧化物和钽氧化物）。
- 串联电容器的总电容小于最小的电容。
- 并联电容器的总电容为各个电容之和。
- 电容器阻断恒定直流。
- 时间常数决定带串联电阻电容器的充、放电时间。
- 在 RC 电路中，充电或放电期间每一个时间常数间隔内电压和电流变化大约 63%。
- 五倍时间常数通常被认为电容器完全充电或放电所需的时间，称为瞬态时间。
- 每个充电时间常数间隔后最终电荷的大致百分比由表 9-4 给出。

表 9-4 每个充电时间间隔后最终电荷的大致百分比

时间常数倍数	最终电荷的大致百分比/%
1	63
2	86
3	95
4	98
5	99（认为是 100%）

- 每个放电时间常数间隔后初始电荷的大致百分比由表 9-5 给出。

表 9-5　每个放电时间常数间隔后初始电荷的大致百分比

时间常数倍数	初始电荷的大致百分比/%
1	37
2	14
3	5
4	2
5	1（认为是 0）

- 电容器中交流电流超前电压 90°。
- 电容器通过交流一定程度上取决于它的电抗和电路其余部分的电阻。
- 容抗是对交流电流的阻碍，用欧姆表示。
- 容抗（X_C）与频率和电容值成反比。
- 串联电容器的总容抗为各个电容器的容抗之和。
- 并联电容器的总容抗为各个容抗倒数之和的倒数。
- 理想情况下，电容器中没有能量损失，因此有功功率（瓦特）为零，但是在大多数电容器中由于漏电电阻存在少量的能量损失。

关键术语

旁路（Bypass）　从一点到地之间连接的电容器，在不影响直流电压的前提下去除交流信号，是去耦的特例。

电容量（Capacitance）　电容器存储电荷的能力。

容抗（Capacitive reactance）　电容器对正弦电流的阻碍，单位为欧姆。

电容器（Capacitor）　一种具有存储电荷能力的电气元件，由称为电介质的绝缘材料分割的一个或多个导体构成。

充电（Charging）　电流从电容器的一个极板搬移电荷并在另一块极板沉积，使一个极板比另一极板正电荷更多的过程。

耦合（Coupling）　在电路中两点之间接电容器允许交流通过而阻止直流通过的方法。

去耦（Decoupling）　从电路中一点（通常在直流电源线上）到地之间接电容器将交流短路到地而不影响直流的方法。

电介质（Dielectric）　电容器极板之间的绝缘材料。

介电常数（Dielectric constant）　电介质材料建立电场能力的度量。

介电强度（Dielectric strength）　电介质材料不被击穿所能承受电压能力的度量。

指数（Exponential）　自然对数（基数）描述的数学函数，电容器的充电和放电服从指数函数。

法拉（Farad）（F）　电容量的单位。

滤波器（Filter）　一种让部分频率通过而阻止其他频率的电路。

瞬时功率（Instantaneous power，*p*）　任意给定瞬间电路的功率值。

RC 时间常数（time constant，RC）　由 R 和 C 数值设定的固定时间间隔，决定 RC 串联电路的时间响应，等于电阻和电容的乘积。

无功功率（Reactive power，P_r）　电容器交替存储和返还电源能量的速率，单位是乏（VAR）。

纹波电压（Ripple voltage）　由于电容器充放电引起的电压小波动。

温度系数（Temperature coefficient）　对于给定的温度变化指定物理量变化量的常数。

瞬态时间（Transient time）　约等于五倍时间常数的间隔。

有功功率（True power，P_{true}）　电路中消耗的功率，通常转化为热。

乏（volt-ampere reactive，var）　无功功率的单位。

关键公式

(9-1) $C=\dfrac{Q}{V}$　　电荷量与电压确定电容

(9-2) $Q=CV$　　电容和电压确定电荷量

(9-3) $V=\dfrac{Q}{C}$　　电荷量和电容确定电压

(9-4) $W=\dfrac{1}{2}CV^2$　　电容器存储的能量

(9-5) $\varepsilon_r=\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$　　介电常数（相对介电系数）

(9-6) $C=\dfrac{A\varepsilon_r(8.85\times10^{-12}\,\text{F/m})}{d}$　　物理参数确定电容

(9-7) $C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ 串联总电容（两个电容器）

(9-8) $C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n}}$ 串联总电容（通用）

(9-9) $V_x = \left(\frac{C_T}{C_x}\right) V_S$ 串联电容器两端电压

(9-10) $C_T = C_1 + C_2$ 两电容器并联

(9-11) $C_T = C_1 + C_2 + C_2 + \cdots + C_n$ n 个电容器并联

(9-12) $\tau = RC$ RC 时间常数

(9-13) $v = V_F + (V_i - V_F)e^{-t/\tau}$ 指数电压（通用）

(9-14) $i = I_F + (I_i - I_F)e^{-t/\tau}$ 指数电流（通用）

(9-15) $v = V_F(1 - e^{-t/RC})$ 从零开始指数增大电压

(9-16) $v = V_i\, e^{-t/RC}$ 指数衰减电压最终到零

(9-17) $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ 容抗

(9-18) $X_{C(tot)} = X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} + \cdots + X_{Cn}$ 串联电容器的容抗

(9-19) $X_{C(tot)} = \frac{1}{\frac{1}{X_{C1}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{C3}} + \cdots + \frac{1}{X_{Cn}}}$ 并联电容器的容抗

(9-20) $I = \frac{V}{X_C}$ 电容器的欧姆定律

(9-21) $V_x = \left(\frac{X_{Cx}}{X_{C(tot)}}\right) V_S$ 电容分压器

(9-22) $P_r = V_{rms} I_{rms}$ 电容器的无功功率

(9-23) $P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_C}$ 电容器的无功功率

(9-24) $P_r = I_{rms}^2 X_C$ 电容器的无功功率

是非测验题

1. 电容器的极板面积正比于电容量。
2. 1200pF 的电容与 1.2μF 相同。
3. 两个电容器和电压源串联，较小的电容器将得到较大电压。
4. 两个电容器与电压源并联，较小的电容器将得到较大电压。
5. 电容器对于恒定直流才表现为开路。
6. 当电容器在两个电平之间充放电时，一个时间常数内电容器上电荷变化差值的 63%。
7. 容抗与所加的频率成正比。
8. 串联电容器的总容抗是各个电容器的积除以和的形式。
9. 电容器的电压超前电流。
10. 无功功率的单位是乏（var)。

自测题

1. 下列哪个是对电容器的准确描述?
   (a) 极板是导电的
   (b) 电介质是极板之间的绝缘体
   (c) 充满电的电容器中存在恒定方向的电流（直流）
   (d) 脱离电源后电容器无限期存储电荷
   (e) 上述都不对
   (f) 上述都对
   (g) 只有 (a) 和 (b) 准确
2. 下面哪个说法正确?
   (a) 充电电容器的电介质中有电流流过
   (b) 电容器接到直流电压源上时将充电到电源电压
   (c) 从电压源断开的电容器可能放电
3. 0.01μF 电容大于
   (a) 0.000 01F (b) 100 000pF
   (c) 1000pF (d) 以上所有
4. 1000pF 电容小于

（a）0.01μF　　（b）0.001μF
（c）0.000 000 01F　　（d）（a）和（c）

5. 当电容器两端电压增大时，存储的电荷
（a）增大　　（b）减小
（c）保持恒定　　（d）波动

6. 当电容器两端电压加倍时，存储的电荷
（a）保持不变　　（b）减半
（c）增大四倍　　（d）加倍

7. 增大电容器的额定电压可通过
（a）增大极板间距　　（b）减小极板间距
（c）增大极板面积　　（d）答案（b）和（c）

8. 增大电容值可通过
（a）减小极板面积　　（b）增大极板间距
（c）减小极板间距　　（d）增大极板面积
（e）答案（a）和（b）　　（f）答案（c）和（d）

9. 1μF、2.2μF、0.047μF 电容器串联，总电容小于
（a）1μF　　（b）2.2μF
（c）0.047μF　　（d）0.001μF

10. 4个0.022μF 电容器并联，总电容是
（a）0.022μF　　（b）0.088μF
（c）0.011μF　　（d）0.044μF

11. 未充电电容器和电阻串联通过开关接到12V电池，开关闭合瞬间电容器两端电压为
（a）12V　　（b）6V
（c）24V　　（d）0V

12. 在问题11中，充满电时电容器两端电压为
（a）12V　　（b）6V
（c）24V　　（d）−6V

13. 在问题11中，电容器充满电大约所需的时间是
（a）RC　　（b）$5RC$
（c）$12RC$　　（d）无法确定

14. 正弦电压加到电容器两端，当电压的频率提高时，电流
（a）增大　　（b）减小
（c）保持不变　　（d）终止

15. 电容器和电阻串联接到正弦波发生器，频率设置使得容抗等于电阻，因此在每个元件两端电压等量，如果频率降低，则
（a）$V_R>V_C$　　（b）$V_C>V_R$
（a）$V_R=V_C$　　（d）$V_C<V_R$

故障排除：征兆与原因

参考图9-59，给每一组征兆确定原因。

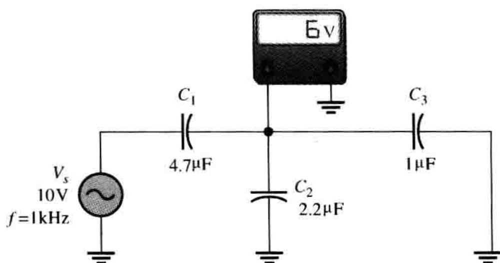


图9-59　电表指示电路的正确读数

1. 征兆：电压表读数为0V。
原因：（a）C_1短路
（b）C_2短路
（c）C_3开路

2. 征兆：电压表读数为10V。
原因：（a）C_1短路
（b）C_2开路
（c）C_3开路

3. 征兆：电压表读数为6.86V。
原因：（a）C_1开路
（b）C_2开路
（c）C_3开路

4. 征兆：电压表读数为0V。
原因：（a）C_1开路
（b）C_2开路
（c）C_3开路

5. 征兆：电压表读数为8.28V。
原因：（a）C_1短路
（b）C_2开路
（c）C_3开路

习题

基本习题

9.1节

1. （a）$Q=50\mu$C，V=10V，求电容。
（b）$C=0.001\mu$F，V=1kV，求电荷量。
（c）$Q=2$mC，$C=200\mu$F，求电压。

2. 将下列电容值从微法转换为皮法。
（a）0.1μF
（b）0.002 5μF
（c）5μF

3. 将下列电容值从皮法转换为微法。

(a) 1000pF
(b) 3500pF
(c) 250pF

4. 将下列电容值从法拉转换为微法。
(a) 0.000 000 1F
(b) 0.002 2F
(c) 0.000 000 001 5F

5. 什么尺寸的电容器能够在极板间电压 100V 时存储 10mJ 能量？

6. 云母电容器极板面积为 $20cm^2$，极板间距为 2.5mil（密尔），请计算电容。

7. 空气电容器极板面积为 $0.1m^2$，极板间距为 0.01m，请计算电容。

8. 某学生想要用方形极板为科学博览项目构造一个 1F 电容器。他打算用 8×10^{-5} m 厚纸介质（$\varepsilon_r=2.5$），科学博览会在体育馆举行，试问他的电容器适合体育馆吗？如果可以构造，极板的尺寸将是多少？

9. 某学生决定用两块边长 30cm 的导电极板构造电容器，他用 8×10^{-5} m 厚纸介质（$\varepsilon_r=2.5$）隔开极板，试问他构造的电容器的电容是多少？

10. 环境温度（25℃）下某电容器的电容量指定为 1000pF，该电容器具有负温度系数 200ppm/℃，试问 75℃时的电容为多少？

11. 0.001μF 电容器具有正温度系数 500ppm/℃，试问温度升高 25℃电容变化多少？

9.2 节

12. 试问在叠箔云母电容器结构中怎样增大极板面积？

13. 云母电容器和陶瓷电容器哪个具有较高的介电常数？

14. 试说明怎样在图 9-60 中 A、B 两点之间接电解电容器。

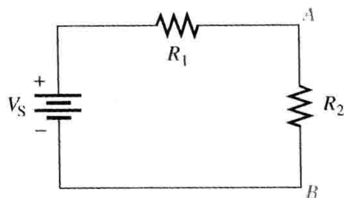


图 9-60

15. 试确定图 9-61 中印刷标签陶瓷片式电容器的值。

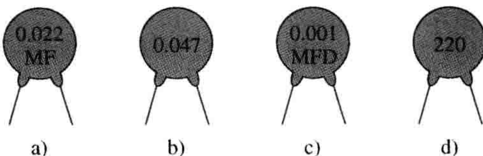


图 9-61

16. 说出两种电解电容器，试问电解电容器与其他电容器如何区别？

17. 参考图 9-8b 识别图 9-62 所示的陶瓷片式电容器剖视图的各个部分。

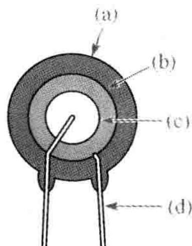


图 9-62

9.3 节

18. 五个 1000pF 电容器串联，试问总电容为多少？

19. 求图 9-63 中各个电路的总电容。

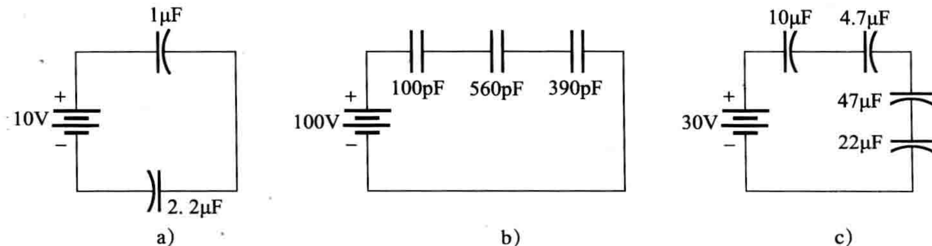


图 9-63

20. 对图9-63中的每个电路，求各个电容器两端的电压。

21. 存储在图9-64所示串联电容器中的总电荷为$10\mu C$，求各个电容器两端的电压。

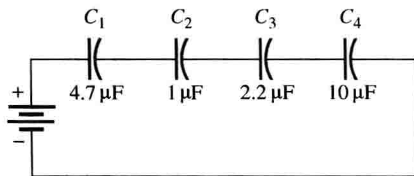
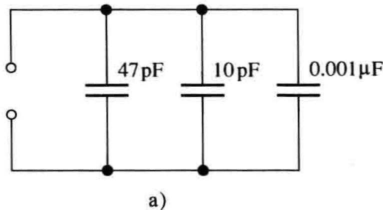


图 9-64

9.4节

22. 求图9-65中每个电路的C_T。



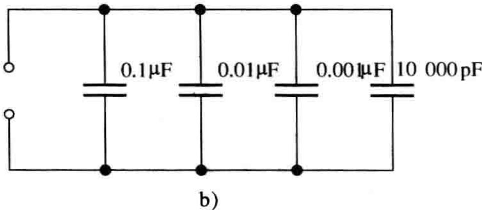


图 9-65

23. 求图9-66中电容器的总电容和总电荷。

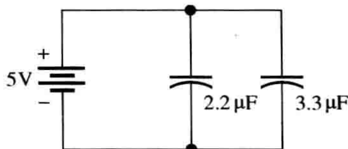


图 9-66

24. 假设在某定时应用中需要$2.1\mu F$的总电容，但手头只有$0.22\mu F$和$0.47\mu F$的电容器（数量不限），试问怎样得到所需的电容？

9.5节

25. 试确定下列串联RC组合的时间常数：
    (a) $R=100\Omega$，$C=1\mu F$
    (b) $R=10M\Omega$，$C=56pF$
    (c) $R=4.7k\Omega$，$C=0.0047\mu F$
    (d) $R=1.5M\Omega$，$C=0.01\mu F$

26. 试确定下列组合下电容器达到充满电所需的时间：
    (a) $R=47\Omega$，$C=47\mu F$
    (b) $R=3300\Omega$，$C=0.015\mu F$
    (c) $R=22k\Omega$，$C=100pF$
    (d) $R=4.7M\Omega$，$C=10pF$

27. 在图9-67所示的电路中，电容器初始未充电，求开关闭合后下列时间的电容器电压。
    (a) $10\mu s$　(b) $20\mu s$
    (c) $30\mu s$　(d) $40\mu s$
    (e) $50\mu s$

28. 图9-68中电容器充电到25V，求开关闭合后下列时间的电容器电压。
    (a) 1.5ms
    (b) 4.5ms
    (c) 6ms
    (d) 7.5ms

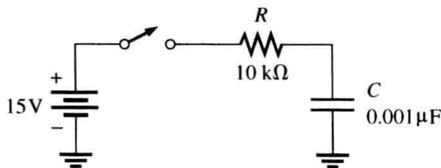


图 9-67

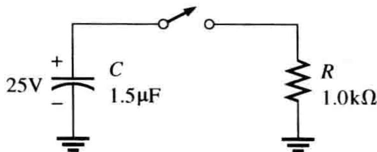


图 9-68

29. 对下列时间段重做习题27。
    (a) $2\mu s$　(b) $5\mu s$
    (c) $15\mu s$

30. 对下列时间段重做习题28。
    (a) 0.5ms　(b) 1ms
    (c) 2ms

9.6节

31. 对下列频率求$0.047\mu F$电容器的X_C。
    (a) 10Hz　(b) 250Hz
    (c) 5kHz　(d) 100kHz

32. 试问图9-69中各个电路总容抗的值为多少？

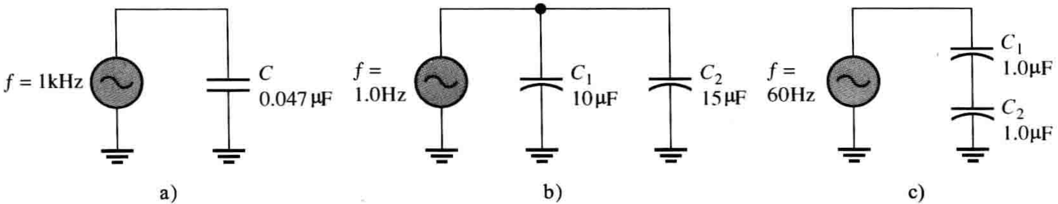


图 9-69 习题 32 图

33. 对图 9-70 所示的电路，求每个电容器的容抗、总容抗和各个电容器两端的电压。

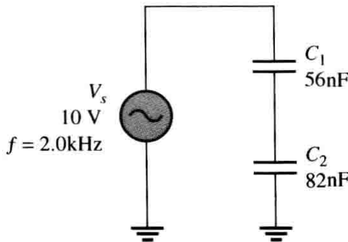


图 9-70 习题 33 图

34. 在图 9-69 所示的各个电路中，产生 100Ω 的 $X_{C(tot)}$ 所需的频率是多少？产生 1kΩ 的 $X_{C(tot)}$ 所需的频率是多少？
35. 有效值为 20V 的正弦电压接某电容器时产生 100mA 有效电流，试问容抗为多少？
36. 10kHz 电压加到 0.0047μF 电容上，测得 1mA 有效电流，试问电压的有效值是多少？
37. 求习题 36 的有功功率和无功功率。

9.7 节

38. 在图 9-52 所示的电源滤波器中，如果在现有电容器上再并联一个电容器，试问对纹波电压有何影响？
39. 在理想情况下，为给放大器电路中给定点消除 10kHz 交流电压，旁路电容的容抗应该为多少？

高级习题

40. 两个串联电容（一个 1μF，另一个未知）从 12V 电源充电，1μF 电容充电到 8V，另一个充电到 4V，试问未知电容的值是什么？
41. 在图 9-68 中 C 放电到 3V 需要多长时间？
42. 在图 9-67 中 C 充电到 8V 需要多长时间？
43. 求图 9-71 所示电路的时间常数。

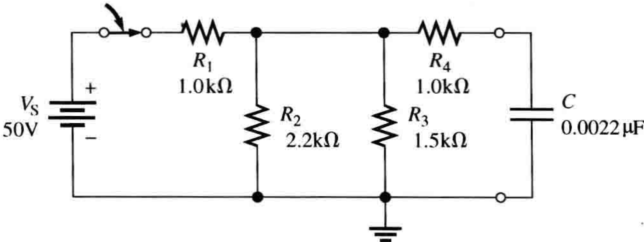


图 9-71

44. 在图 9-72 中，电容初始未充电，在开关闭合后 $t = 10\mu s$ 时的瞬时电容电压为 7.2V，求 R 值。

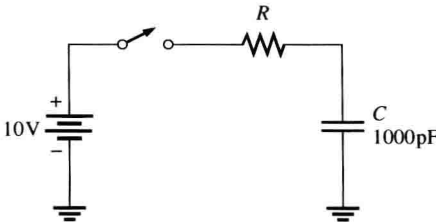


图 9-72

45. (a) 在图 9-73 中，开关拨向位置 1 时电容未充电，开关在位置 1 保持 10ms，然后拨向位置 2 并一直保持，试画出电容电压的完整波形。
   (b) 如果开关在位置 2 保持 5ms 后拨回位置 1，然后停在位置 1，试问波形将怎样表现？
46. 对于图 9-23 所示的考毕兹振荡器，假设 C_1 变为 3.3nF。
   (a) 新的总电容量是多少？
   (b) 新的反馈分量是多少？
47. 对于图 9-23 所示的考毕兹振荡器，假设需要

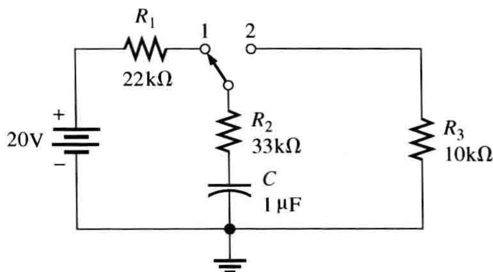


图 9-73

改变 C_1 获得 15%的反馈分量，试问应选择什么电容值？

48. 假设图 9-57 所示的分离放大器具有 5kHz、1V 有效值输入，绘制电路上 B 点（晶体管的基极）的完整信号，设晶体管对输入电压分压器不存在负载效应。
49. 对于图 9-57 所示的分立放大器，试问在什么频率时 C_1 的容抗等于 1.0kΩ?

Multisim 仿真故障排除习题

50. 打开文件 P09-50，试确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
51. 打开文件 P09-51，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
52. 打开文件 P09-52，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
53. 打开文件 P09-53，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
54. 打开文件 P09-54，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。

各节测试题答案

9.1 节

1. 电容量是存储电荷的能力。
2. (a) 一法拉等于 1 000 000 微法。
   (b) 一法拉等于 1×10^{12} 皮法。
   (c) 一微法等于 1 000 000 皮法。
3. $0.0015\mu F\times10^6 pF/\mu F = 1500pF$；$0.0015\mu F\times10^{-6}F/\mu F = 0.000\,000\,001\,5F$
4. $W = 1/2CV^2 = 1/2\times0.01\ \mu F\times(15V)^2 = 1.125\mu J$
5. (a) 极板面积增大时电容量增大。
   (b) 极板间隔增大时电容量减小。
6. $1000V/mil\times2mil=2kV$

9.2 节

1. 电容通常按照电介质材料分类。
2. 固定电容不能改变；而可调电容可以改变。
3. 电解电容是有极性的。
4. 安装有极性电容时必须保证额定电压足够，且正端接电路的正极性侧。
5. 正引线必须接地。

9.3 节

1. 串联电容的 C_T 小于最小电容。
2. $C_T=61.2pF$
3. $C_T=0.006\mu F$
4. $V=(0.006\mu F/0.01\mu F)\times10V=6V$

9.4 节

1. 各个电容相加得 C_T。
2. 用 5 个 $0.001\mu F$ 电容并联得到 $0.05\mu F$。
3. $C_T=167pF$

9.5 节

1. $\tau=RC=1.2\mu s$
2. $5\tau=6\mu s$；V_C 约等于 5V
3. $V_{2ms}=0.86\times10V=8.6V$；
   $V_{3ms}=0.95\times10V=9.5V$；
   $V_{4ms}=0.98\times10V=9.8V$；
   $V_{5ms}=0.99\times10V=9.9V$。
4. $V_C=0.37\times100V=37V$

9.6 节

1. $X_C=1/2\pi fC=677k\Omega$
2. $f=1/2\pi CX_C=796Hz$
3. $I_{rms}=1V/1.59\Omega=629mA$
4. 电流超前电压 90°
5. $P_{true}=0W$

9.7 节

1. 一旦电容充电到峰值，在下一个峰值前只放电非常少，因此平滑了整流电压。
2. 耦合电容允许交流从一点到另一点通过，但阻止恒定直流通过。
3. 耦合电容必须足够大，以使在需要通过的频率容抗可忽略而没有阻碍。
4. 去耦电容将瞬时电压从电源线短路到地。
5. X_C 与频率成反比，这也是滤波器通过交流信号的能力。

例题中相关问题答案

例 9-1 10kV
例 9-2 0.047μF
例 9-3 100 000 000pF
例 9-4 62.7pF
例 9-5 278pF
例 9-6 1.54μF
例 9-7 2.83V
例 9-8 650pF
例 9-9 0.052μF
例 9-10 891μs
例 9-11 8.36V
例 9-12 8.13V
例 9-13 0.7ms；95V
例 9-14 0.42V
例 9-15 3.39kHz
例 9-16 (a) 1.83kΩ；(b) 408Ω
例 9-17 4.40mA
例 9-18 8.72V
例 9-19 0W；1.01mVAR

是非测验题答案

1.T 2.F 3.T 4.F 5.T 6.T 7.F 8.F 9.F 10.T

自测题答案

1. (g) 2. (b) 3. (c) 4. (d) 5. (a) 6. (d) 7. (a) 8. (f) 9. (c) 10. (b)
11. (d) 12. (a) 13. (b) 14. (a) 15. (b)

故障排除：征兆与原因的答案

1. (b) 2. (a) 3. (c) 4. (a) 5. (b)

第10章 RC 电路

本章目标

- 描述串联 RC 电路中电压和电流的关系
- 确定串联 RC 电路的阻抗与相位角
- 分析串联 RC 电路
- 确定并联 RC 电路的阻抗与相位角
- 分析并联 RC 电路
- 分析串并联 RC 电路
- 确定 RC 电路的功率
- 讨论基本的 RC 应用
- 排除 RC 电路故障

含有电阻和电容的 RC 电路是一种典型的有抗电路。本章介绍串联和并联 RC 电路及其对正弦电压的响应，同时还将讨论串并联组合的电路；在 RC 电路中引入了功率，讨论了实际的额定功率；介绍了三个 RC 电路的应用例子，演示如何利用简单电阻和电容组合；本章还包括对 RC 电路的常见故障诊断。

有抗电路的分析方法类似于前面学习过的直流电路，有抗电路问题可以通过每次一个频率来解决，且必须使用相量数学。

10.1 串联 RC 电路的正弦响应

当正弦电压加到 RC 串联电路时，电路中各个电压降和电流同样也是正弦的，且与电源电压具有相同的频率，电容引起电压与电流之间的相移，相移的大小取决于电阻和电容电抗的数值大小。

学习完本节内容，应该能够

- 描述 RC 串联电路的电压与电流的关系；
- 讨论电压和电流波形；
- 讨论相移。

如图 10-1 所示的 RC 串联电路，电阻电压（V_R）、电容电压（V_C）和电流（I）都是与电源频率相同的正弦波。由于电容的原因电路中引入了相移，我们已经学习过，电阻的电压和电流是同相位的，并且相位超前于电源电压。电容电压滞后于电源电压。电流和电容电压之间的相位角为 90°，电路中一般相位关系如图 10-1 所示。

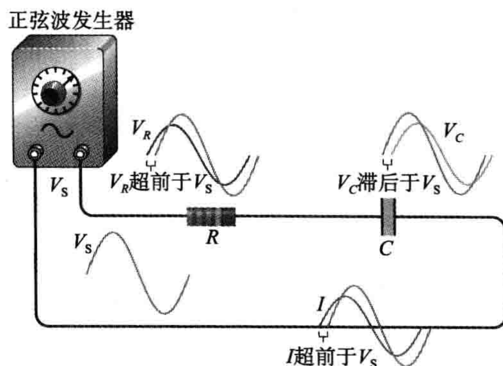


图 10-1 V_R、V_C和 I 相对于源电压的一般相位关系正弦响应演示，V_R和 I 同相位，V_R和 V_C相位差 90°

电压和电流的幅度与相位关系取决于电阻和电容电抗的数值，当是纯电阻电路时，电源电压和总电流之间的相位角为零；当是纯电容电路时，电源电压和总电流之间的相位角为 90°；当是电阻与电容电抗的组合电路时，电源电压和总电流之间的相位角介于零和 90°之间，由电阻值和电容电抗值确定。

本节测试题

1. 一60Hz的正弦电压加到RC串联电路中，试问电容电压的频率是多少？电流的频率是多少？
2. 在RC串联电路中V_S和I之间的相移由什么决定？
3. 当RC串联电路中电阻值大于电容电抗时，试问电源电压和总电流之间的相位角靠近0°还是靠近90°？

10.2 串联RC电路的阻抗及相位角

在无抗电路中，对电流的阻碍就是电阻。同时具有电阻和电抗的电路中，由于电抗及其产生的相移，电路对电流的阻碍要复杂得多。本节将介绍对交流电流的总抵抗力——阻抗，它包含了相移的影响。

学习完本节内容，应该能够

- 在RC串联电路中确定阻抗及其相位角；
- 定义阻抗；
- 定义相位角；
- 画出阻抗三角形；
- 计算总阻抗的幅值；
- 计算相位角。

RC串联电路的**阻抗**由电阻与电容电抗组成，是电路对正弦电流的总阻碍，单位是欧姆。**相位角**为总电流与总电压之间的相位差。

纯电阻电路中，阻抗简单地等于总电阻；纯电容电路中，阻抗为总电容电抗；而RC串联电路的阻抗则由电阻（R）和电容电抗（X_C）共同确定，三种情况如图10-2所示。阻抗的大小用符号Z表示。

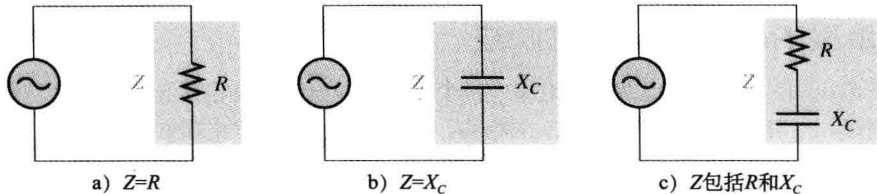


图10-2 阻抗的三种情况

交流电路分析中，R和X_C都作为相量处理，如图10-3a所示。相对于R，X_C呈现在−90°位置，这是因为RC串联电路的电容电压滞后于电流或电阻电压90°。由于Z是R与X_C的相量和，其相量表示如图10-3b所示。重新将相量画成如图10-3c所示，形成一个直角三角形，该直角三角形称为阻抗三角形。每个相量的长度均表示欧姆值，角度θ（希腊字母）为RC串联电路的相位角，表示电源电压与电流之间的相位差。

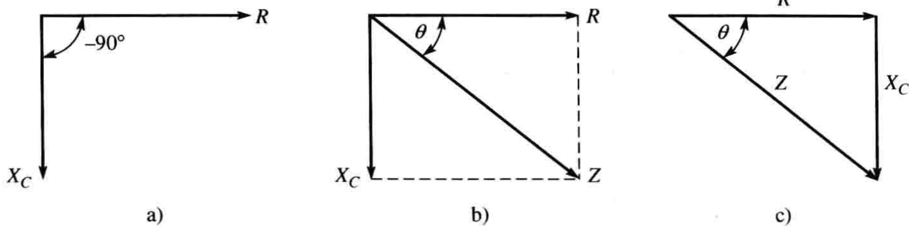


图10-3 RC串联电路阻抗角的演化

从直角三角形的三角几何（毕达哥拉斯定理[⊖]）可知，阻抗的大小（长度）可以用电阻和电抗表示。

⊖ 即勾股定理。——译者注

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \tag{10-1}$$

阻抗的大小（Z）用欧姆表示，如图 10-4 所示。

相位角 θ 的值可表示为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right) \tag{10-2}$$

符号 arctan 代表正切的反函数，可在大多数计算器通过按 2nd 键或 TAN^{-1} 键实现。

图 10-4 *RC* 串联电路的阻抗

【例 10-1】 试确定图 10-5 所示 *RC* 电路的阻抗与相位角，画出阻抗三角形。

解： 阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{(47\Omega)^2 + (100\Omega)^2} = 110\Omega$$

相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right) = \arctan\left(\frac{100\Omega}{47\Omega}\right) = \arctan(2.13) = 64.8°$$

电源电压滞后于电流 64.8°。

阻抗三角形如图 10-6 所示。

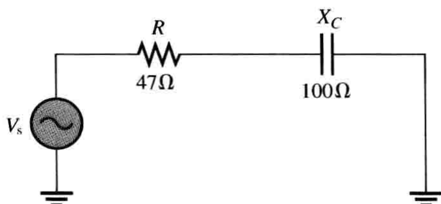


图 10-5

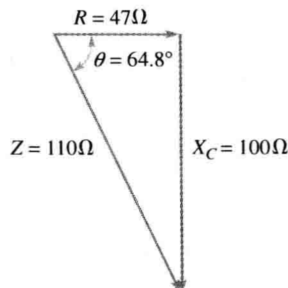


图 10-6 阻抗三角形

相关问题：在图 10-5 中，如果 R=1.0kΩ、X_C=2.2kΩ，求 Z。

本节测试题

1. 请给出阻抗的定义。
2. 在串联 *RC* 电路中电源电压是超前还是滞后于电流？
3. 在 *RC* 电路中引起相位角的原因是什么？
4. 串联 *RC* 电路的电阻为 33Ω、电容电抗为 50Ω，试问阻抗值是多少？相位角是多少？

10.3 串联 *RC* 电路分析

在分析串联 *RC* 电路时利用欧姆定律和基尔霍夫电压定律确定电压、电流和阻抗。本节还要介绍 *RC* 超前与滞后电路。

学习完本节内容，应该能够

- 将欧姆定律和基尔霍夫电压定律应用到串联 *RC* 电路；
- 确定电压和电流之间的相位关系；
- 证明阻抗与相位角如何随频率变化；
- 分析 *RC* 滞后电路；
- 分析 *RC* 超前电路。

10.3.1 欧姆定律

欧姆定律在 *RC* 串联电路中的应用涉及 Z、V 和 I 三个物理量。欧姆定律的三个等价形式如下：

$$V = IZ \tag{10-3}$$

$$I = \frac{V}{Z} \tag{10-4}$$

$$Z = \frac{V}{I} \tag{10-5}$$

下面两个例题说明欧姆定律的应用。

【例 10-2】 图 10-7 中电流为 0.2mA，试确定电源电压和相位角，画出阻抗三角形。

解： 电容电抗为

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi 1000\text{Hz} \times 0.01\mu\text{F}} = 15.9\text{k}\Omega$$

阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{(10\text{k}\Omega)^2 + (15.9\text{k}\Omega)^2} = 18.8\text{k}\Omega$$

应用欧姆定律得

$$V_S = IZ = 0.2\text{mA} \times 18.8\text{k}\Omega = 3.76\text{V}$$

相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right) = \arctan\left(\frac{15.9\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega}\right) = 57.8°$$

电源电压幅度为 3.76V，滞后于电流 57.8°。

阻抗三角形如图 10-8 所示。

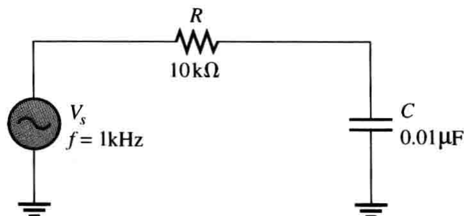


图 10-7

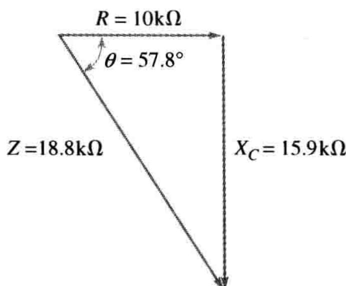


图 10-8

相关问题：在图 10-7 中，如果 f=2kHz、I=200μA，试求 V_S。

【例 10-3】 求图 10-9 中 RC 电路的电流。

解： 电容电抗为

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 1.5\text{kHz} \times 0.022\mu\text{F}} = 4.82\text{k}\Omega$$

阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{(2.2\text{k}\Omega)^2 + (4.82\text{k}\Omega)^2} = 5.30\text{k}\Omega$$

应用欧姆定律得

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{10\text{V}}{5.30\text{k}\Omega} = 1.89\text{mA}$$

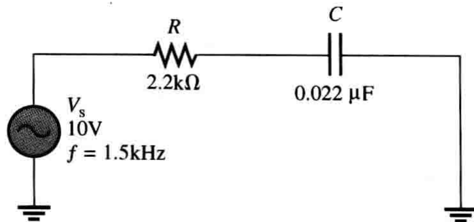


图 10-9

相关问题：求图 10-9 中 V_S 和 I 之间的相位角。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E10-03，测量电流和电阻与电容两端的电压。

10.3.2 电流与电压的相位关系

在 RC 串联电路中，流过电阻和电容的电流相同，所以电阻电压与电流同相位，而电容电压滞后于电流 90°，因此，电阻电压 V_R与电容电压 V_C之间存在 90°相位差，波形如图 10-10 所示。

由基尔霍夫电压定律可知，电压降之和必须等于电源电压，但由于 V_R与 V_C存在 90°相位差，应作相量求和，V_C滞后于 V_R 90°，如图 10-11a 所示。V_S是 V_R与 V_C的相量和，如图 10-11b 所示，可用下面的式子表示：

$$V_S = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} \tag{10-6}$$

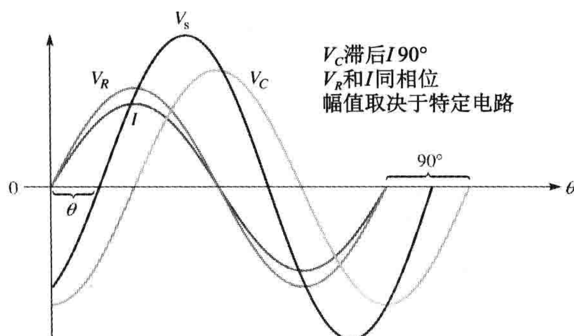


图 10-10 RC 串联电路中电压与电流的相位关系

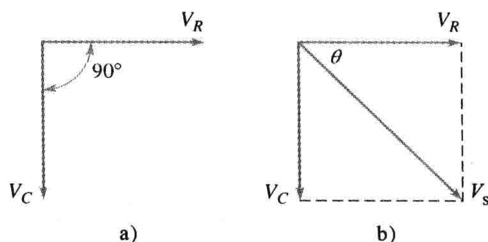


图 10-11 图 10-10 中波形的电压相量图

电阻电压与电源电压之间的相位角数值可表示为

$$\theta = \arctan\left(\frac{V_C}{V_R}\right) \tag{10-7}$$

因为电阻电压与电流同相位，所以式（10-7）的 θ 同样表示了电源电压与电流的相位角，与 $\arctan(X_C/R)$ 等价。

图 10-12 显示了图 10-10 所示波形图的电压与电流相量图。

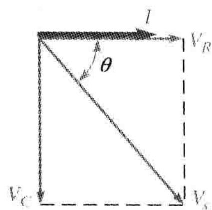


图 10-12 图 10-10 中波形的电压和电流相量图

【例 10-4】 求图 10-13 中的电源电压与相位角，画出电压相量图。

解： 由于 V_R与 V_C存在 90°相位差，不能直接相加，电源电压为 V_R与 V_C的相量和。

$$V_S = \sqrt{V_R^2 + V_C^2} = \sqrt{(10\text{V})^2 + (15\text{V})^2} = 18\text{V}$$

电阻电压与电源电压之间的相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{V_C}{V_R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{15\text{V}}{10\text{V}}\right) = 56.3°$$

电压相量如图 10-14 所示。

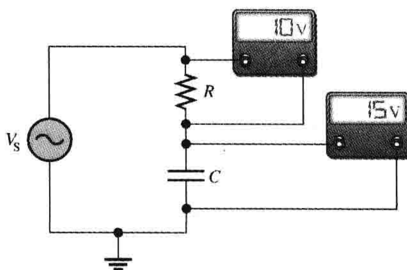


图 10-13

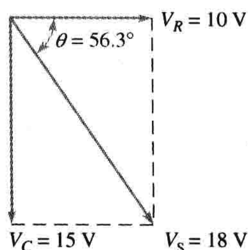


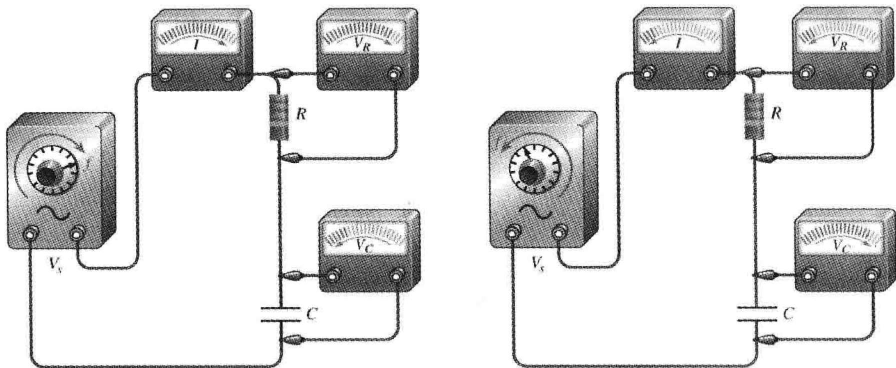
图 10-14

相关问题：某 RC 串联电路中 $V_S=10V$、$V_R=7V$，求 V_C。

10.3.3 阻抗与相位角随频率的变化

我们知道，电容电抗与频率成反比，因为 $Z=\sqrt{R^2+X_C^2}$，可以看出，当 X_C 增大时，平方根符号下的整个项增大，所以总阻抗增大；当 X_C 减小时，总阻抗也减小。因此，在 RC 串联电路中，Z 与频率变化方向相反，即频率增大 Z 减小，而频率降低 Z 增大。

图10-15演示了 RC 串联电路中电压与电流如何随频率增高或降低而变化，图中电源电压大小保持不变。图10-15a显示频率增高时 X_C 减小，所以电容两端电压减小。随着 X_C 减小 Z 也减小，引起电流增大，电流增大使电阻 R 两端电压增大。



a) 当频率增高时，Z 随着 X_C 减小而减小，引起 I 和 V_R 增大而 V_C 减小　b) 当频率降低时，Z 随着 X_C 增大而增大，引起 I 和 V_R 减小而 V_C 增大

图10-15 当电源频率变化时阻抗的变化影响电压和电流，电源电压保持幅度不变

图10-15b显示频率降低时 X_C 增大，因此更多电压降在电容两端，随着 X_C 增大 Z 也增大，导致电流减小，电流的减小使电阻 R 两端电压减小。

从图10-16中可观察到 Z 与 X_C 的变化，当频率增高时，由于 V_S 恒定，Z 两端电压保持不变（$V_S=V_Z$），C 两端的电压减小。由欧姆定律（$Z=V_Z/I$）可得，增大的电流指示 Z 在减小，增大的电流同样指示 X_C 在减小（$X_C=V_C/I$），V_C 的减小对应于 X_C 的减小。

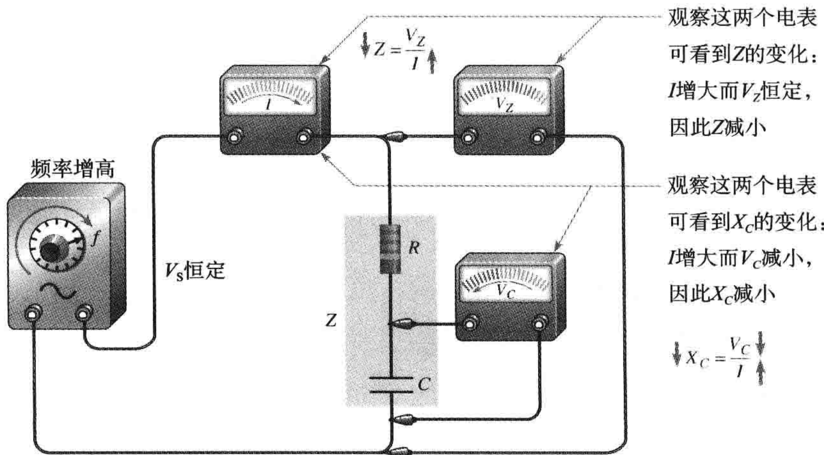


图10-16 Z 和 X_C 随频率变化的演示

因为 X_C是 RC 串联电路中产生相位角的因子，所以 X_C的变化产生相位角的变化。频率增高时，X_C变小，相位角减小。频率降低时，X_C变大，相位角增大。由于 I 和 V_R同相位，所以 V_S与 V_R之间的角度就是电路的相位角。

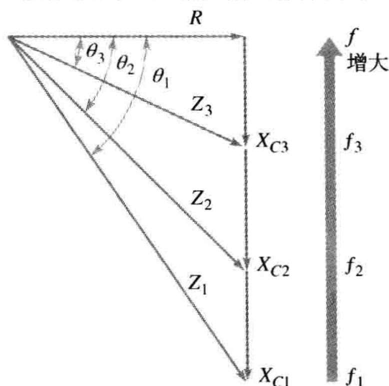


图 10-17 频率增高时 X_C减小、Z 减小、θ 减小，每个频率值对应一个阻抗三角形

图 10-17 利用阻抗三角形说明 X_C、Z 和 θ 随频率改变的变化情况。当然，图中 R 保持不变。关键点是 X_C与频率成反比变化，总阻抗大小及相位角也与频率变化方向相反。例 10-5 演示了这个关系。

【例 10-5】 对于图 10-18 所示的 RC 串联电路，求下列各频率时的阻抗与相位角。

(a) 10kHz (b) 20kHz (c) 30kHz

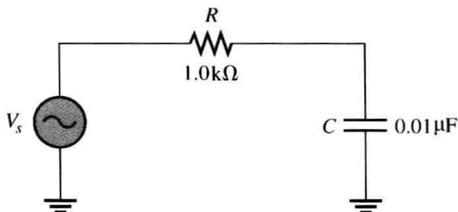


图 10-18

解： (a) 对于 $f=10\text{kHz}$，计算阻抗如下

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\pi\times 10\text{kHz}\times 0.01\mu\text{F}}=1.59\text{k}\Omega$$

$$Z=\sqrt{R^2+X_C^2}=\sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2+(1.59\text{k}\Omega)^2}=1.88\text{k}\Omega$$

相位角为

$$\theta=\arctan\left(\frac{X_C}{R}\right)=\arctan\left(\frac{1.59\text{k}\Omega}{1.0\text{k}\Omega}\right)=57.8^\circ$$

(b) 对于 $f=20\text{kHz}$

$$X_C=\frac{1}{2\pi\times 20\text{kHz}\times 0.01\mu\text{F}}=796\Omega$$

$$Z=\sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2+(796\Omega)^2}=1.28\text{k}\Omega$$

$$\theta=\arctan\left(\frac{796\Omega}{1.0\text{k}\Omega}\right)=38.5^\circ$$

(c) 对于 $f=30\text{kHz}$

$$X_C=\frac{1}{2\pi\times 30\text{kHz}\times 0.01\mu\text{F}}=531\Omega$$

$$Z=\sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2+(531\Omega)^2}=1.13\text{k}\Omega$$

$$\theta=\arctan\left(\frac{531\Omega}{1.0\text{k}\Omega}\right)=28.0^\circ$$

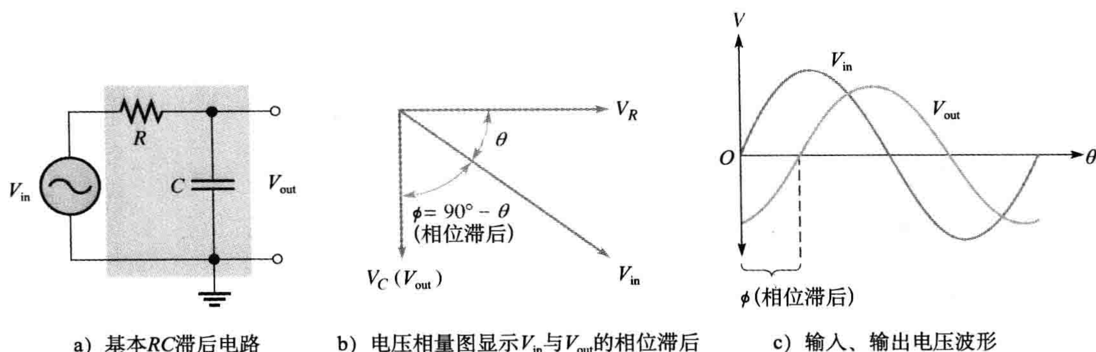
注意，随着频率的增高，X_C、Z、θ 均减小。

相关问题：求 $f=1\text{kHz}$ 时图 10-18 的总阻抗与相位角。

10.3.4 RC 滞后电路

RC 滞后电路是一种输出电压滞后于输入电压一个特定角度 ϕ 的移相电路。移相电路常用于电子通信系统和其他应用中。

基本 RC 滞后电路如图 10-19a 所示。牢记相位角 θ 是在电源（输入）电压和电流之间测量。因为电阻上电压和电流同相位，若采用电压表示，等价说法是相位角在 V_{in}和 V_R之间测量。在电容两端输出，因此，V_{in}和 V_C之间的相位滞后为 $90^\circ-\theta$。该角度记为 ϕ，表示输入（V_{in}）和输出（V_{out}）的相位差，如图 10-19b 所示。



a) 基本RC滞后电路　　b) 电压相量图显示V_{in}与V_{out}的相位滞后　　c) 输入、输出电压波形

图 10-19　RC滞后电路（$V_{out}=V_C$）

由于$\theta=\arctan(X_C/R)$，相位角ϕ的值可以表示为

$$\phi = 90° - \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right) \tag{10-8}$$

滞后电路输入、输出电压波形如图10-19c所示。输入与输出的准确相位滞后量取决于电阻和电容电抗值，输出电压的大小同样也取决于这些值。

【例 10-6】　求图10-20所示滞后电路从输入到输出的相位滞后量。

解：首先确定电容电抗

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 1\text{kHz} \times 0.1\mu\text{F}} = 1.59\text{k}\Omega$$

输出电压与输入电压的相位滞后为

$$\phi = 90° - \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right) = 90° - \arctan\left(\frac{1.59\text{k}\Omega}{680\Omega}\right) = 23.2°$$

输出电压滞后输入电压23.2°。

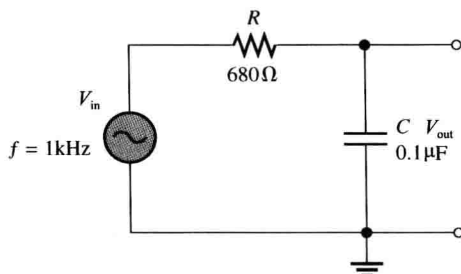


图　10-20

相关问题：在滞后电路中，如果频率增高，试问相位滞后将如何变化？

可将相位滞后电路视为一个分压器，输入电压一部分降在R两端，另一部分降在C两端。输出电压用下面式子确定：

$$V_{out} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2+X_C^2}}\right)V_{in} \tag{10-9}$$

【例 10-7】　对于例10-6中图10-20所示的滞后电路，求输入电压有效值为10V时的输出电压。画出表示正确关系的输出波形。X_C值（1.59kΩ）和ϕ值（23.2°）已在例10-6中求得。

解：利用公式（10-9）确定图10-20中滞后电路的输出电压

$$V_{out} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2+X_C^2}}\right)V_{in} = \frac{1.59\text{k}\Omega \times 10\text{V}}{\sqrt{(680\Omega)^2+(1.59\text{k}\Omega)^2}}$$

$$= 9.2\text{Vrms}$$

波形如图10-21所示（注意图中已将有效值转换为峰值）。

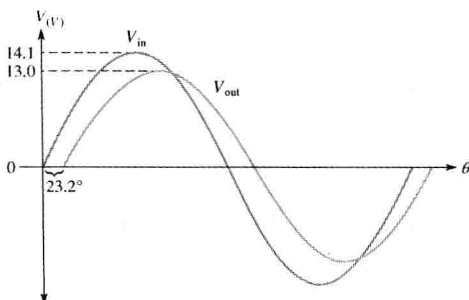


图　10-21

相关问题：在滞后电路中，如果频率增高，试问输出电压将如何变化？

频率对滞后电路的影响　由于电路相位角随频率的增高而减小，输入与输出之间的相位滞后ϕ将

随频率的增高而增大，从例 10-8 中可以看到这一关系。同样，由于随着频率的增高 X_C 变小，输入电压降在电容上的电压变小，因此 V_{out} 的幅度随频率的增高而减小。

10.3.5 RC 超前电路

RC 超前电路是一种输出电压超前于输入电压一个特定角度 ϕ 的移相电路。基本 *RC* 超前电路如图 10-22a 所示，注意它与滞后电路的区别。这里输出电压取自电阻两端，电压关系由图 10-22b 所示的相量图给出。因为 V_R 与 I 同相位，输出电压 V_{out} 超前于输入电压 V_{in} 的角度与电路相位角相同。

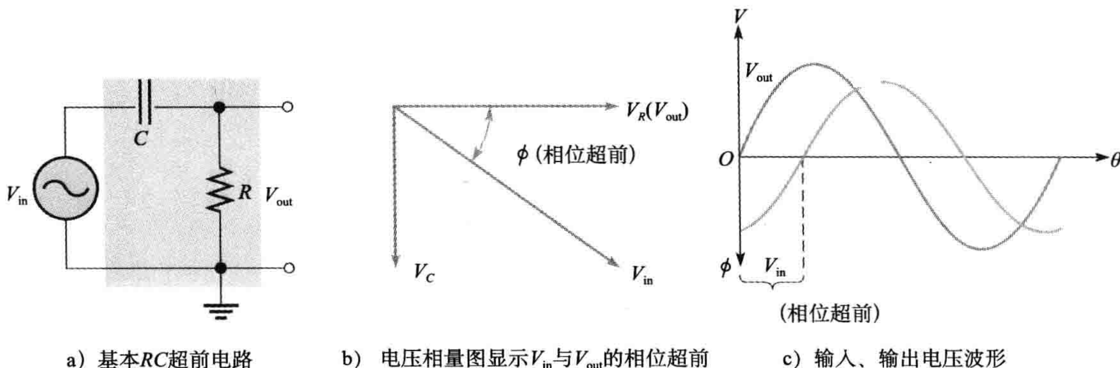


图 10-22 *RC* 超前电路（$V_{out}=V_R$）

当输入、输出波形显示在示波器上时，观察到的关系类似于图 10-22c。相位超前量和输出电压幅度取决于 R 和 X_C 的值，相位角 ϕ 的值可以表示为

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right) \tag{10-10}$$

输出电压可表示为

$$V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{in} \tag{10-11}$$

【例 10-8】 计算图 10-23 中电路的相位超前与输出电压。

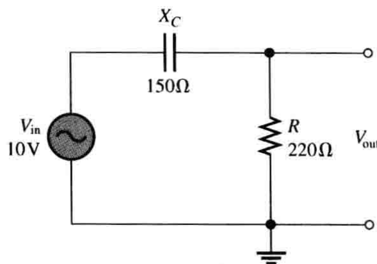


图 10-23

解： 相位超前为

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right) = \arctan\left(\frac{150\Omega}{220\Omega}\right) = 34.3°$$

输出超前于输入 34.3°。

利用公式（10-11）确定输出电压

$$V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{in} = \frac{220\Omega}{\sqrt{(220\Omega)^2 + (150\Omega)^2}} \times 10\text{V} = 8.26\text{V}$$

相关问题：在图 10-23 中，试问 R 增大将怎样影响相位超前与输出电压？

频率对超前电路的影响 相位超前与电路相位角 θ 相同，随频率的增高而减小。由于随着频率的增高 X_C 变小，输入电压降在电阻上的电压变大，所以 V_{out} 的幅度随频率的增高而增大。

系统举例 10-1 前置放大中缓冲放大器

模拟系统的输入信号通常电平较低，在发送到控制器或处理器前必须进行放大，以避免出现传输问题。对于低电平信号，常用场效应晶体管（FET）来构成一级缓冲放大器，后接增益级，形成简单的前置放大系统。电压缓冲放大器是增益为 1（输出电压等于输入电压）的放大

器，但是，对输入信号呈现高阻抗，从而防止对低阻抗信号源负载的影响。图10-24a所示为一个缓冲放大器，用于驱动其他增益级。该放大器的等效输入电路就是一个耦合电容C_1和偏置电阻R_G，如图10-24b所示，这是计算对驱动电路影响时唯一需要考虑的放大器部分，因为晶体管对输入信号而言等效为开路。

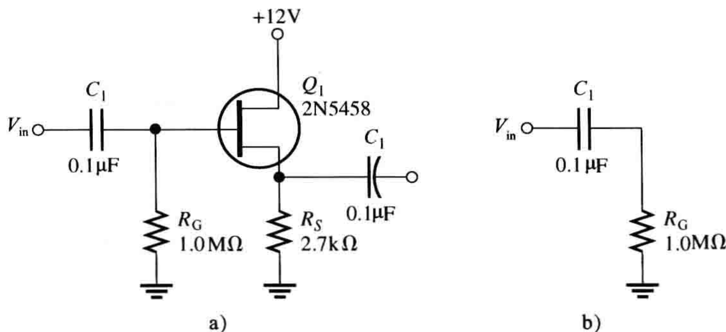


图10-24 缓冲放大器

该放大器的输入端有利于整个前置放大具有较低截止频率，可简化为一个本节学习的基本RC电路，事实上，任何电容耦合的放大器输入端都可以简化为这种相同的基本电路。这种简化允许将基本直流/交流定理应用到更复杂的电路去计算响应，例如，可以很容易地确定缓冲放大器电容两端的电压与电阻两端的电压相等的频率（该频率称为截止频率f_c，将在10.8节讨论）。如果电容两端的电压等于电阻两端的电压，则$X_C=R$，因此，

$$X_C = \frac{1}{2\pi f_C} = R$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 1.0\text{M}\Omega \times 0.1\mu\text{F}} = 1.59\text{Hz}$$

本节测试题

1. 某RC串联电路中$V_R=4\text{V}$、$V_C=6\text{V}$，试问电源电压的大小是多少？
2. 在问题1中，相位角是多少？
3. 试问RC串联电路中电容电压与电阻电压的相位差是多少？
4. 当RC串联电路中电源电压的频率增高时，下面各个量会发生什么变化？
   (a) 电容电抗　(b) 阻抗
   (c) 相位角
5. 某RC滞后电路由4.7kΩ电阻和0.022μF电容构成，求输入与输出电压在3kHz频率时的相位滞后。
6. 某RC超前电路的各元件值与问题5中滞后电路的相同，试问在3kHz输入电压有效值为10V时输出电压的大小是多少？

10.4 并联RC电路的阻抗及相位角

本节将学习如何确定并联RC电路的阻抗及其相位角，本节还要介绍电导（G）、电容电纳（B_C）和总导纳（Y_{tot}），这些量在并联电路分析中是有用的。

学习完本节内容，应该能够

- 确定并联RC电路的阻抗及其相位角；
- 将总阻抗表示成积除以和形式；
- 用R和X_C表示相位角；

- 求电导、电容电纳和导纳；
- 将导纳转换为阻抗。

图 10-25 所示为一个基本的并联 RC 电路。

公式（10-12）中，阻抗表达式给出的积除以和的形式类似于两个电阻并联的情况，这里分母是 R 和 X_C 的相量和。

$$Z=\frac{RX_C}{\sqrt{R^2+X_C^2}} \tag{10-12}$$

图 10-25 并联 RC 电路

电源电压与总电流的相位角值可用 R 和 X_C 表示，如式（10-13）所示。

$$\theta=\arctan\left(\frac{R}{X_C}\right) \tag{10-13}$$

该式可从 10.5 节介绍的支路电流等效公式（10-22）推导出来。

【例 10-9】 对于图 10-26 中的每个电路，求阻抗与相位角。

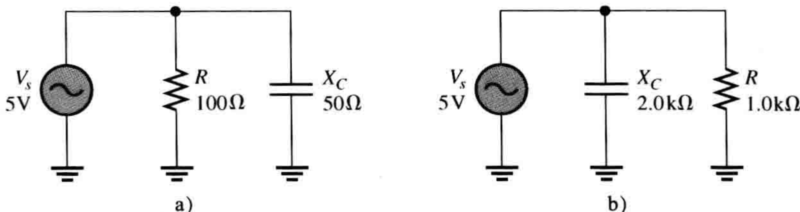


图 10-26

解： 对于图 10-26a 中的电路，阻抗与相位角为

$$Z=\frac{RX_C}{\sqrt{R^2+X_C^2}}=\frac{100\Omega\times 50\Omega}{\sqrt{(100\Omega)^2+(50\Omega)^2}}=44.7\Omega$$

$$\theta=\arctan\left(\frac{R}{X_C}\right)=\arctan\left(\frac{100\Omega}{50\Omega}\right)=63.4^\circ$$

对于图 10-26b 中的电路，

$$Z=\frac{1.0\text{k}\Omega\times 2.0\text{k}\Omega}{\sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2+(2.0\text{k}\Omega)^2}}=894\Omega$$

$$\theta=\arctan\left(\frac{1.0\text{k}\Omega}{2.0\text{k}\Omega}\right)=26.6^\circ$$

相关问题：如果频率加倍，求图 10-26a 中的 Z。

电导、电容电纳和导纳

回顾电导（G）定义为电阻的倒数，可表达为

$$G=\frac{1}{R} \tag{10-14}$$

现在介绍两个用于并联 RC 电路的新术语。电纳为电抗的倒数，因此电容电纳（B_C）为电容电抗的倒数，它是电容允许电流通过的能力度量，可表示为

$$B_C=\frac{1}{X_C} \tag{10-15}$$

导纳（Y）是阻抗的倒数，表示为

$$Y = \frac{1}{Z} \tag{10-16}$$

上面三个物理量的单位都是西门子（S），它是欧姆的倒数。

并联电路中使用电导（G）、电容电纳（B_C）和导纳（Y）往往比使用电阻（R）、电容电抗（X_C）和阻抗（Z）容易。在图10-27a所示的实际并联RC电路中，总导纳是电导和电容电纳的相量之和，如图10-27b所示。

$$Y_{tot} = \sqrt{G^2 + B_C^2} \tag{10-17}$$

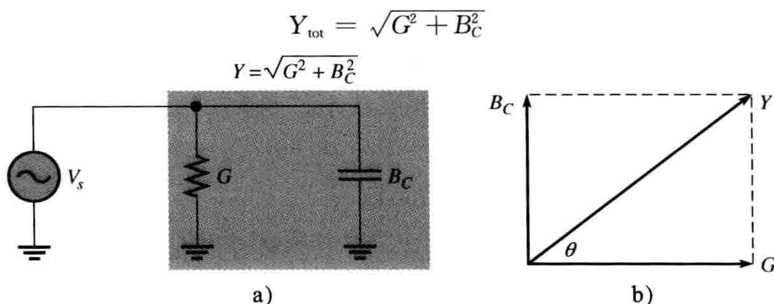


图10-27 并联RC电路的导纳

【例10-10】 确定图10-28中的总导纳，然后将其转换为阻抗。

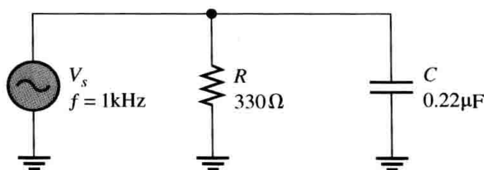


图 10-28

解：为了求Y，首先计算G和B_C的值，因为$R=330\Omega$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{330\Omega} = 3.03\text{mS}$$

电容电抗为

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 1000\text{Hz} \times 0.22\mu\text{F}} = 723\Omega$$

电容电纳为

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{723\Omega} = 1.38\text{mS}$$

因此，总导纳为

$$Y_{tot} = \sqrt{G^2 + B_C^2} = \sqrt{(3.03\text{mS})^2 + (1.38\text{mS})^2} = 3.33\text{mS}$$

转换为阻抗

$$Z = \frac{1}{Y_{tot}} = \frac{1}{3.33\text{mS}} = 300\Omega$$

相关问题：在图10-28中，如果f增至2.5kHz，计算导纳。

本节测试题

1. 若1.0kΩ电阻与650Ω电容电抗并联，试确定Z。
2. 给出电导、电容电纳和导纳的定义。
3. 如果$Z=100\Omega$，试问Y的值是多少？
4. 在某并联RC电路中，$R=50\Omega$、$X_C=75\Omega$，试求Y。

10.5 并联RC电路分析

并联RC电路的分析中应用欧姆定律和基尔霍夫电流定律，检验RC并联电路中的电流与电压关系。

学习完本节内容，应该能够

- 分析并联 RC 电路；
- 将欧姆定律和基尔霍夫电流定律应用到并联 RC 电路；
- 说明相位角与阻抗随频率如何变化；
- 将并联电路转换为等效串联电路。

为了方便分析并联电路，使用阻抗的欧姆定律公式可以利用 $Y=1/Z$ 关系重新表示。

$$V=\frac{I}{Y} \tag{10-18}$$

$$I=VY \tag{10-19}$$

$$Y=\frac{I}{V} \tag{10-20}$$

【例 10-11】 求图 10-29 中的总电流与相位角。

解： 首先确定总导纳，电容电抗为

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\pi\times1.5\text{kHz}\times0.022\mu\text{F}}=4.82\text{k}\Omega$$

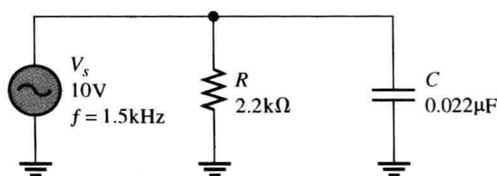


图 10-29

电导为

$$G=\frac{1}{R}=\frac{1}{2.2\text{k}\Omega}=455\mu\text{S}$$

电容电纳为

$$B_C=\frac{1}{X_C}=\frac{1}{4.82\text{k}\Omega}=207\mu\text{S}$$

因此，总导纳为

$$Y_{\text{tot}}=\sqrt{G^2+B_C^2}=\sqrt{(455\mu\text{S})^2+(207\mu\text{S})^2}=500\mu\text{S}$$

接下来应用欧姆定律计算总电流

$$I_{\text{tot}}=VY_{\text{tot}}=10\text{V}\times500\mu\text{S}=5.00\text{mA}$$

相位角为

$$\theta=\arctan\left(\frac{R}{X_C}\right)=\arctan\left(\frac{2.2\text{k}\Omega}{4.82\text{k}\Omega}\right)=24.5°$$

总电流为 5.00mA，滞后于电源电压 24.5°。

相关问题：如果频率加倍，试问总电流是多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E10-11，验证计算所得总电流值，然后测量每条支路的电流。将频率加倍到 3kHz，测量总电流。

电流与电压的相位关系

图 10-30a 显示了基本并联 RC 电路中所有的电压和电流。从中可见，电源电压 V_S 同时呈现在电阻和电容支路两端，所以 V_S、V_R 和 V_C 幅度和相位均相同，总电流 I_{tot} 在节点处分成两条支路电流 I_R 和 I_C。

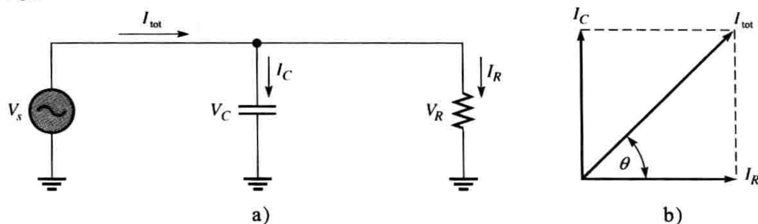
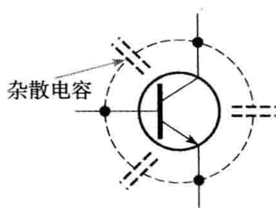


图 10-30 并联 RC 电路中的电流和电压

系统注释　杂散电容

杂散电容是一种存在于所有电子电路和系统中的看不见的电容，发生在任何由绝缘体隔开导体的地方，例如基本晶体管的情况。对模拟电路而言，杂散电容将减小高频响应；在高速数字电路中，杂散电容限制了开关速度。晶体管的杂散电容可画成等效的并联 RC 电路，使晶体管电路的高频分析可以应用基本电路概念。



流过电阻的电流与电压同相位，而流过电容器的电流超前于电压 90°，所以电阻电流超前于电容器电压 90°。根据基尔霍夫电流定律，总电流是两条支路电流的相量和，如图 10-30b 所示的相量图。总电流可表示为

$$I_{tot}=\sqrt{I_R^2+I_C^2} \tag{10-21}$$

电阻电流与总电流之间的相位角为

$$\theta=\arctan\left(\frac{I_C}{I_R}\right) \tag{10-22}$$

式（10-22）是式（10-13）$\theta=\arctan(R/X_C)$ 的等价形式。

图 10-31 显示了完整的电流和电压相量图。注意，I_C超前于 I_R 90°，I_R与电压（$V_S=V_R=V_C$）同相位。

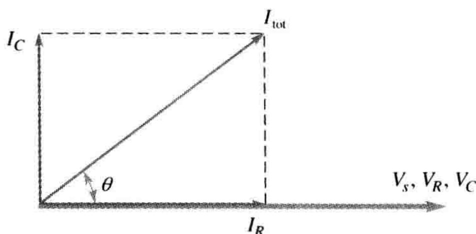


图 10-31　并联 RC 电路电流和电压相量图（大小由特定电路确定）

【例 10-12】　求图 10-32 中每个电流值，描述并联 RC 电路 I_R、I_C和 I_{tot}的相位关系，画出电流相量图。

解：电阻电流、电容电流和总电流表示如下

$$I_R=\frac{V_S}{R}=\frac{12\text{V}}{220\Omega}=54.5\text{mA}$$

$$I_C=\frac{V_S}{X_C}=\frac{12\text{V}}{150\Omega}=80\text{mA}$$

$$I_{tot}=\sqrt{I_R^2+I_C^2}=\sqrt{(54.5\text{mA})^2+(80\text{mA})^2}=96.8\text{mA}$$

相位角为

$$\theta=\arctan\left(\frac{I_C}{I_R}\right)=\arctan\left(\frac{80\text{mA}}{54.5\text{mA}}\right)=55.7°$$

I_R与电源电压同相位，I_C超前于电源电压 90°，I_{tot}超前于电源电压 55.7°。电流相量图如图 10-33所示。

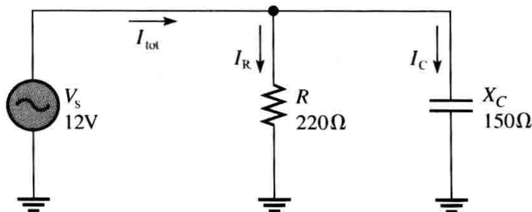


图　10-32

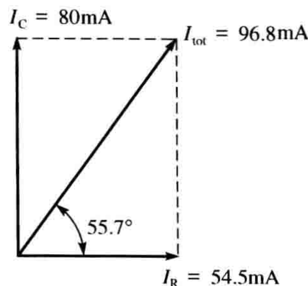


图 10-33　例 10-12 的电流相量图

相关问题：某并联电路中，I_R=100mA、I_C=60mA，求总电流和相位角。

本节测试题

1. 并联 RC 电路的导纳为 3.5mS，电源电压为6V，试问总电流是多少?
2. 某并联 RC 电路中；电阻电流为 10mA、电容电流为 15mA，求相位角与总电流。
3. 试问并联 RC 电路中电容电流与电源电压之间的相位角是多少?

10.6 串并联 RC 电路分析

前几节学习的概念可以用来分析 R 和 C 元件串联与并联组合的电路。

学习完本节内容，应该能够

- 分析串、并联 RC 电路；
- 确定总阻抗；
- 计算电流与电压；
- 测量阻抗与相位角。

如同在直流电路中一样，组合交流电路可以通过将串联或并联元件组合成等效电路来求解，下面的例子演示了串并联有抗电路的分析。

【例 10-13】 在图 10-34 所示的串并联 RC 电路中求下列各量。

(a) 总阻抗 (b) 总电流 (c) I_{tot}超前于 V_S的相位角

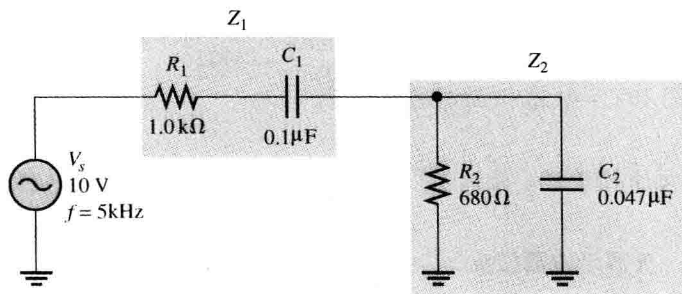


图 10-34

解: (a) 首先计算电容电抗大小

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi \times 5\text{kHz} \times 0.1\mu\text{F}} = 318\Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi \times 5\text{kHz} \times 0.047\mu\text{F}} = 677\Omega$$

一种方法是求出电路并联部分的串联等效电阻与电容电抗，然后电阻相加 ($R_1 + R_{eq}$) 得总电阻，电容电抗相加 ($X_{C1} + X_{C(eq)}$) 得总电抗，再从总的电阻和电抗确定总阻抗。

为求并联部分 (Z_2) 的阻抗，先求导纳

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{680\Omega} = 1.47\text{mS}$$

$$B_{C2} = \frac{1}{X_{C2}} = \frac{1}{677\Omega} = 1.48\text{mS}$$

$$Y_2 = \sqrt{G_2^2 + B_{C2}^2} = \sqrt{(1.47\text{mS})^2 + (1.48\text{mS})^2} = 2.09\text{mS}$$

$$Z_2 = \frac{1}{Y_2} = \frac{1}{2.09\text{mS}} = 478\Omega$$

与电路并联部分相关的相位角为

$$\theta_p = \arctan\left(\frac{R_2}{X_{C2}}\right) = \arctan\left(\frac{680\Omega}{677\Omega}\right) = 45.1^\circ$$

并联部分的串联等效值为

$$R_{eq} = Z_2\cos\theta_p = 478\Omega \times \cos(45.1^\circ) = 337\Omega$$
$$X_{C(eq)} = Z_2\sin\theta_p = 478\Omega \times \sin(45.1^\circ) = 339\Omega$$

总的电路电阻为

$$R_{tot} = R_1 + R_{eq} = 1000\Omega + 337\Omega = 1.34k\Omega$$

总的电路电抗为

$$X_{C(tot)} = X_{C1} + X_{C(eq)} = 318\Omega + 339\Omega = 657\Omega$$

总的电路阻抗为

$$Z_{tot} = \sqrt{R_{tot}^2 + X_{C(tot)}^2} = \sqrt{(1.34k\Omega)^2 + (657\Omega)^2} = 1.49k\Omega$$

(b) 利用欧姆定律求总电流

$$I_{tot} = \frac{V_S}{Z_{tot}} = \frac{10V}{1.49k\Omega} = 6.71mA$$

(c) 为求相位角，将电路视为 R_{tot}和 $X_{C(tot)}$的串联组合，I_{tot}超前于 V_S的相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_{C(tot)}}{R_{tot}}\right) = \arctan\left(\frac{657\Omega}{1.34k\Omega}\right) = 26.1^\circ$$

相关问题：求图10-34中 Z_1和 Z_2两端的电压。

Multisim 仿真

打开 Multisim 文件 E10-13，验证计算的总电流值，测量流过 R_2和 C_2的电流，测量 Z_1和 Z_2两端的电压。

系统举例 10-2　无源示波器探头

虽然有多种示波器探头，但是最常用的是×10 无源探头。×10 是指探头对信号衰减 10 倍。探头的目的是尽可能准确地传输信号，同时避免拾取噪声或影响被测电路（负载效应）。

由于输入放大器、电缆和杂散电容的影响，典型的示波器输入端具有约 20pF 的内部电容。在图10-35所示的电路中集中归入 C_{in}，虚线用于提醒这不是物理连接的电容但具有电容的属性。示波器的输入放大器还存在大约 1.0MΩ 的内电阻，记为 R_{in}，完整的电路通常有一个探头本身的串联电阻 R_{probe}和小的可调电容 C_{probe}，用于调节优化探头/示波器响应。

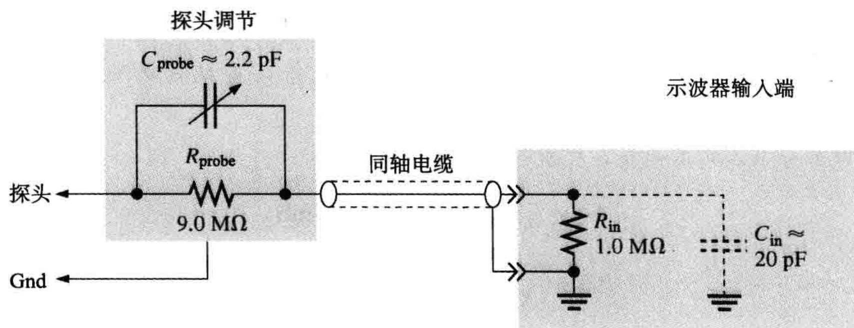


图10-35　无源示波器探头

在低频端，与电阻相比，小电容器具有非常高的电抗，忽略电容器，形成一个 10∶1 的电阻分压器。在高频端，C_{probe}和 C_{in}的电容电抗与电阻相比都很小，忽略电阻，C_{probe}和 C_{in}形成

一个 10∶1 的电容分压器，保持频率响应平坦。示波器探头电路的净效应是，按探头的×10 比值，降低输入电容为原来的 1/10，同时增大输入阻抗 10 倍，从而减小对电路的负载效应。

电路测量

确定 Z_{tot} 现在我们来看如何通过测量确定例 10-13 所示电路中的 Z_{tot}。首先，总阻抗按下列步骤进行测量，如图 10-36 所示（其他方法也是可能的）。

第一步：使用正弦波发生器，设置电源电压为已知值（10V），频率设置为 5kHz，用电压表检查电压，用频率计数器或示波器检查频率，而不是依赖信号发生器的标示值。

第二步：如图 10-36 所示连接电流表，测量总电流。也可以测量 R_1 两端的电压，然后计算电流。

第三步：利用欧姆定律计算总阻抗。

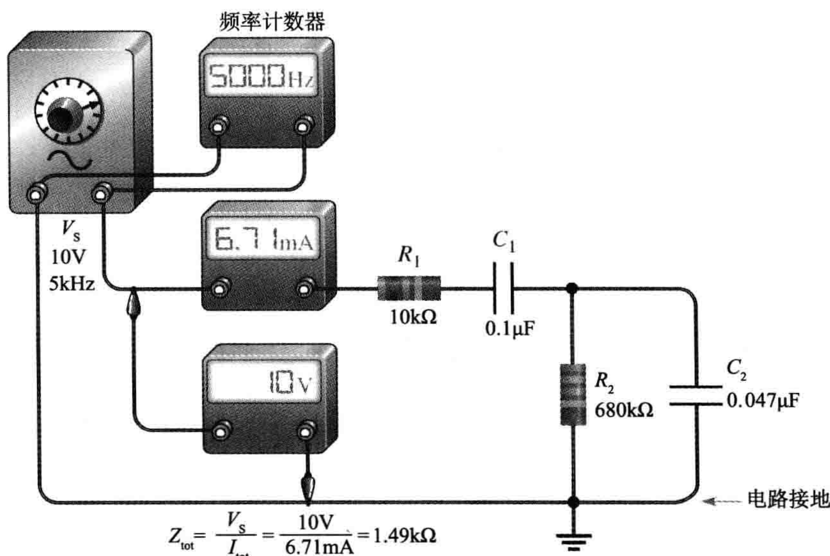


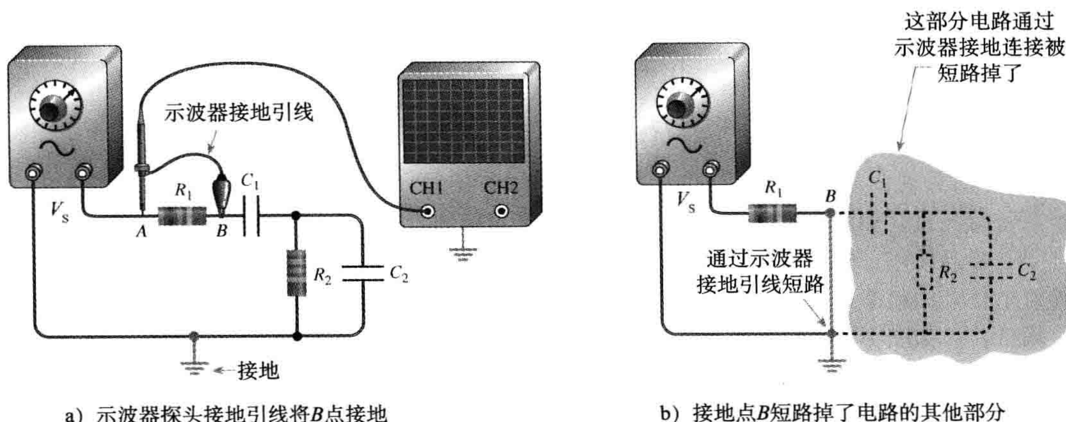
图 10-36 通过测量 V_S 和 I_{tot} 确定 Z_{tot}

确定 θ 为了测量相位角，电源电压和总电流必须以恰当的时间关系显示在示波器屏幕上。用示波器测量物理量有两种基本类型的示波器探头：电压探头和电流探头。电流探头虽是一个方便的装置，但往往不像电压探头那样即时可用[⊖]，因此，我们将在相位测量技术中仅限使用电压探头。虽然有特殊的隔离方法，典型的示波器无源电压探头有两点连接到电路：探头端部和接地引线。这样，所有电压测量必须被参考接地点。

由于只使用电压探头，总电流无法直接测量，但是，对于相位测量，R_1 两端的电压与总电流同相位，可以用来建立电流的相位角。

进行实际相位测量之前，还有一个显示 V_{R1} 的问题。如果示波器探头接在电阻两端，如图 10-37a所示，示波器接地引线将把 B 点短路到地，从而旁路了其他元件，实际上从电路中把这些元件去除了，如图 10-37b 所示（假设示波器没有和电源地线隔离）。

⊖ 电流探头一般不是示波器的标准配置内容，需要另外购买。——译者注



a）示波器探头接地引线将B点接地

b）接地点B短路掉了电路的其他部分

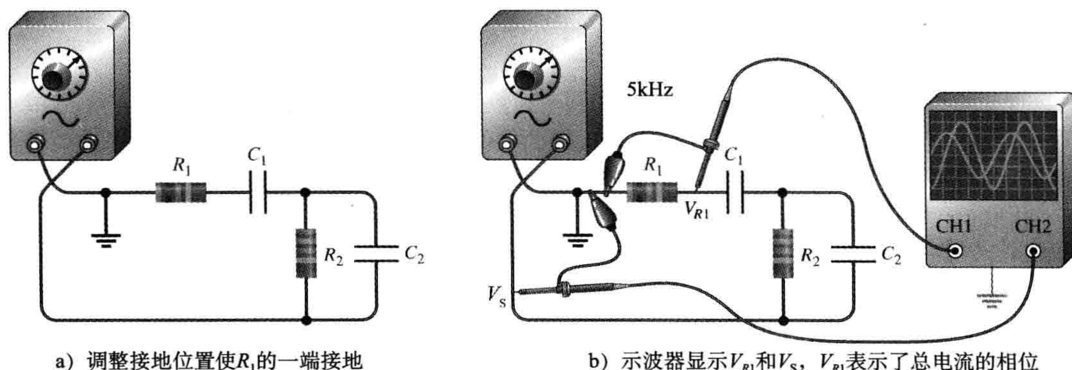
图 10-37 当仪器与电路共地时直接跨接元件测量的影响。示波器接地将部分电路短路掉

系统注释 高频差分探测

大多数示波器允许将两个单端探头组合起来对非接地元件进行测量，这在低频时是一个很好的方法。但是对于高频，每个通道单独的路径可导致两个信号之间的延迟差异，从而导致幅度和定时误差。探测高频和快速信号更好的方法是使用差分探头，差分探头的探针采用差分放大器，使两个信号相减，允许示波器一个通道对非接地元件进行测量，测量结果更准确。

为了避免这个问题，应改换信号发生器输出端，使得 R_1 的一端接在地端，如图 10-38a 所示。现在示波器可以接在 R_1 两端显示 V_{R1}，如图 10-38b 所示。一个探头接在电源电压两端，显示 V_S。现在，示波器 1 通道输入为 V_{R1}，2 通道输入为 V_S，示波器由电源电压触发（这里是 2 通道）。

将探针接到电路之前，应对齐的两条水平线（轨迹）使之显示为示波器屏幕中心的一条线。要做到这一点，将探针接地并调节垂直位置旋钮，使两条轨迹向屏幕中心移动，直到重叠。这个过程可确保两个波形具有相同的过零点，因此，可以进行精确的相位测量。



a）调整接地位置使R_1的一端接地

b）示波器显示V_{R1}和V_S，V_{R1}表示了总电流的相位

图 10-38 调整接地使得可直接测量对地电压而其他电路部分不短路

一旦已经在示波器屏幕上显示了稳定波形，即可测量电源电压的周期，然后，使用 Volts/Div 控件调整波形的振幅，直到两个波形看上去具有相同的幅度。现在，通过使用 Sec/Div 控件将波形作水平方向扩展，展宽两个波形的水平距离，两个波形之间的水平距离表示时间。两波形之间沿水平线相隔的格数乘以 Sec/Div 设置值就等于两波形之间的时间间隔 Δt。此外还可以使用光标来确定 Δt（如果示波器具有此功能）。

确定了周期 T 和波形间的时间间隔 Δt，就可以用下式计算相位角：

$$\theta = \left(\frac{\Delta t}{T}\right)360° \tag{10-23}$$

图 10-39 显示了在 Multisim 时示波器的仿真屏幕显示。图 10-39a 中波形对齐且通过伏/格细调控制两波形使显示的幅度相同，两个波形的周期为 200μs。调节 Sec/Div 控件扩展波形以便 Δt 读数更准确，如图 10-39b 所示，在中心线上过零点之间有 3.0 格，Sec/Div 控件设置为每格 5.0μs，两波形间隔为 3.0 格。

相位角为

$$\theta = \left(\frac{\Delta t}{T}\right)360° = \frac{15\mu s}{200\mu s} \times 360° = 27°$$

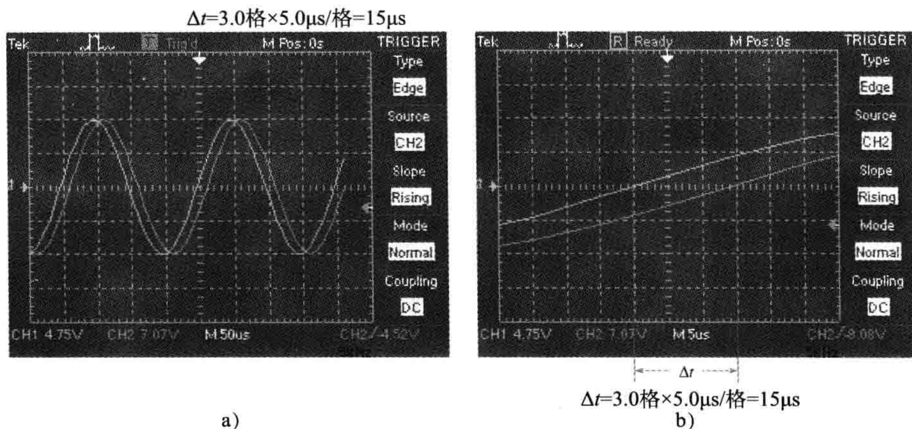


图 10-39 用示波器确定相位角

本节测试题

1. 说明为什么示波器探头接地必须要接到电路的接地端。
2. 试问图 10-34 中 R_1 两端的电压是多少？
3. 图 10-35 中，如果 $C_{in}=15\text{pF}$，试问 C_{probe} 应调节为什么值？

10.7 RC 电路的功率

在纯电阻交流电路中，电源提供的所有能量全部被电阻以热能的形式消耗掉。在纯电容电路中，在电压周期的部分时间电源提供的所有能量都被电容存储起来，然后在电压周期的另一部分时间返还给电源，所以没有净能量转换为热。当电路中同时存在电阻和电容时，一部分能量由电容交替地存储返还，另一部分能量则被电阻消耗掉。转换成热的能量多少由电阻与电容电抗的相对值确定。

学习完本节内容，应该能够

- 确定 RC 电路的功率；
- 说明有功功率和无功功率；
- 画出功率三角形；
- 定义功率因数；
- 说明视在功率；
- 计算 RC 电路的功率。

在 RC 串联电路中，当电阻大于电容电抗时，电源提供的总能量中，电阻消耗的部分大于电容存储的部分。类似地，当电抗大于电阻时，则电源提供的总能量中，电容存储的部分大于转换为热的部分。

消耗在电阻上的功率有时又称为有功功率（P_{true}），电容的功率称为无功功率（P_r），此处再将计算公式重复给出，有功功率的单位是瓦特（W），无功功率的单位是乏（VAR）。

$$P_{true}=I_{tot}^2R \tag{10-24}$$

$$P_r=I_{tot}^2X_C \tag{10-25}$$

10.7.1 RC电路的功率三角形

串联RC电路的通用阻抗相量图如图10-40a所示，由于功率P_{true}和P_r与R和X_C只相差一个因子I_{tot}^2，所以功率关系可以用类似的图形表示，如图10-40b所示。

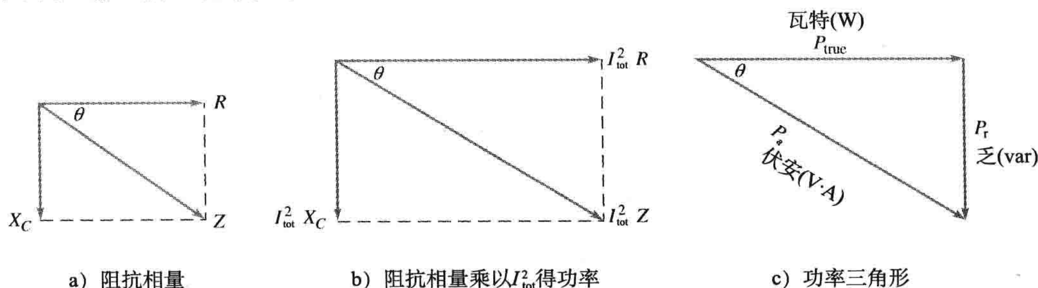


图10-40 串联RC电路的功率三角形推导

由I_{tot}^2Z产生的功率表示*视在功率*P_a，任何时刻，P_a都表现为电源与RC电路之间将被传输的总功率。视在功率中一部分是有功功率，另一部分是无功功率。视在功率的单位是伏安（VA）。视在功率的表达式是

$$P_a=I_{tot}^2Z \tag{10-26}$$

图10-40b的图形可重新布局成图10-40c所示的直角三角形，该三角形称为功率三角形。利用几何规则，P_{true}可表示为

$$P_{true}=P_a\cos\theta$$

由于P_a等于I_{tot}^2Z或V_SI_{tot}，有功功率的公式可以写成

$$P_{true}=V_SI_{tot}\cos\theta \tag{10-27}$$

式中，V_S为电源功率，I_{tot}为总电流。

对于纯电阻电路，$\theta=0°$，$\cos0°=1$，所以P_{true}等于V_SI_{tot}。而对于纯电容电路，$\theta=90°$，$\cos90°=0$，所以P_{true}等于零。正如我们前面学习的，理想电容没有功率消耗。

10.7.2 功率因数

有功功率计算中的$\cos\theta$项称为*功率因数*，表示为

$$PF=\cos\theta \tag{10-28}$$

随着电源电压与总电流之间相位角的增大，功率因数减小，表示无功功率增大。功率因数越小，功率消耗越小。

功率因数在纯电抗电路的0到纯电阻电路的1之间变化，因为电流超前于电压，RC电路中的功率因数称为超前功率因素。

【例10-14】 试确定图10-41所示RC电路的功率因数与有功功率。

解：计算电容电抗与相位角

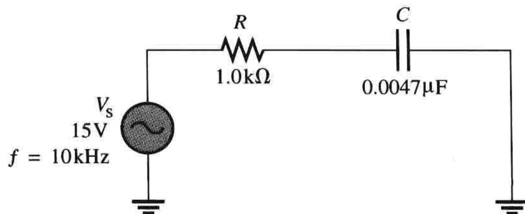


图 10-41

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 10\text{kHz} \times 0.0047\mu\text{F}} = 3.39\text{k}\Omega$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right) = \arctan\left(\frac{3.39\text{k}\Omega}{1.0\text{k}\Omega}\right) = 73.6°$$

功率因数为

$$PF = \cos\theta = \cos(73.6°) = 0.282$$

阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2 + (3.39\text{k}\Omega)^2} = 3.53\text{k}\Omega$$

因此，电流为

$$I = \frac{V_S}{Z} = \frac{15\text{V}}{3.53\text{k}\Omega} = 4.25\text{mA}$$

有功功率为

$$P_{\text{true}} = V_S I\cos\theta = 15\text{V} \times 4.25\text{mA} \times 0.282 = 18.0\text{mW}$$

相关问题：如果图 10-41 中的频率减半，试问功率因数是多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 文件 E10-14，测量电流并与计算值比较，测量频率在 10kHz、5kHz 和 20kHz 时 R 和 C 两端的电压，解释观察到的现象。

10.7.3 视在功率的意义

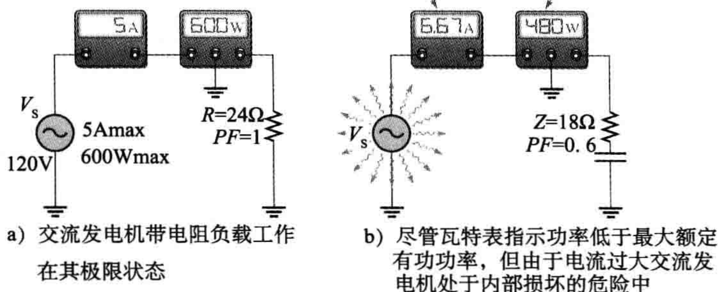
视在功率是表现为将要在电源与负载之间传输的功率，由两部分组成：有功功率分量和无功功率分量。

在所有电气与电子系统中，做功的只是有功功率，无功功率只是简单地在电源与负载之间来回穿梭。理想情况下，就做有用功而言，所有电力传送到负载应该是有功功率而没有无功功率。然而，在大多数实际情况下的负载都具有一些与之相关联的电抗，因此必须处理两个功率分量。

对于任意有抗负载，总电流有两个分量：电阻分量和电抗分量。如果仅考虑负载的有功功率（瓦特），只是处理负载从电源吸取总电流的一部分，为了真实刻画负载将从电源吸取的实际电流，必须考虑视在功率（单位为 VA）。

诸如交流发电机这样的电源向负载提供电流有一个最大值上限，如果负载吸取电流大于该最大值，电源将受到损坏。图 10-42a 显示了一个 120V 交流发电机，它可以向负载提供最大 5A 电流。假设发电机额定功率为 600W，接 24Ω 纯电阻负载（功率因数为 1），电流表显示电流为 5A，瓦特表指示功率为 600W。在这种情况下，尽管交流发电机工作在最大电流和最大功率，但交流发电机没有问题。

现在考虑负载改为有抗负载的情况，阻抗为 18Ω，功率因数为 0.6，如图 10-42b 所示。电流



a) 交流发电机带电阻负载工作在其极限状态

b) 尽管瓦特表指示功率低于最大额定有功功率，但由于电流过大交流发电机处于内部损坏的危险中

图 10-42 当负载为有抗时电源的额定有功功率是不合适的，应该用 VA 作额定而不是瓦特

为120V/18Ω = 6.67A，超出了最大电流值，尽管瓦特表读数为480W，小于交流发电机的额定功率，但是过大的电流将可能损坏交流发电机。该例说明，额定有功功率可能具有欺骗性，并不适合交流电源，制造商应该标定该交流发电机额定功率为600VA，而不能标定为600W。

【例10-15】　对于图10-43所示的电路，求有功功率、无功功率和视在功率，X_C已确定为2.0kΩ。

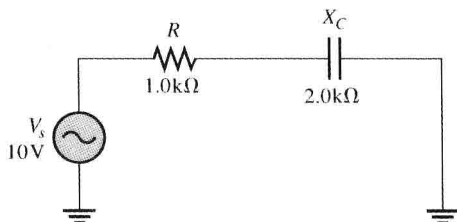


图　10-43

解：首先求总阻抗，以便计算电流

$$Z_{tot} = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2 + (2.0\text{k}\Omega)^2} = 2.24\text{k}\Omega$$

$$I = \frac{V_S}{Z_{tot}} = \frac{10\text{V}}{2.24\text{k}\Omega} = 4.46\text{mA}$$

相位角 θ 为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2.0\text{k}\Omega}{1.0\text{k}\Omega}\right) = 63.4°$$

有功功率为

$$P_{true} = V_S I\cos\theta = 10\text{V} \times 4.46\text{mA} \times \cos(63.4°) = 20\text{mW}$$

注意，如果用公式 $P_{true} = I^2 R$，所得到的结果相同。

无功功率为

$$P_r = I^2 X_C = (4.46\text{mA})^2 \times 2.0\text{k}\Omega = 39.8\text{mvar}$$

视在功率为

$$P_a = I^2 Z = (4.46\text{mA})^2 \times 2.24\text{k}\Omega = 44.6\text{mV} \cdot \text{A}$$

视在功率也是 P_{true}和 P_r的相量之和。

$$P_a = \sqrt{P_{true}^2 + P_r^2} = 44.6\text{mV} \cdot \text{A}$$

相关问题：在图10-43中，如果 X_C=10kΩ，试问有功功率是多少？

本节测试题

1. 试问 RC 电路中消耗功率的元件是什么？
2. 如果相位角 θ 为 45°，试问功率因数是多少？
3. 某串联 RC 电路具有下列参数值：R=330Ω、X_C=460Ω 和 I =2A，求有功功率、无功功率和视在功率。

10.8　基本应用

RC电路常作为复杂电路的一部分用于各种场合，其中的三个应用是振荡器的移相电路、频率选择电路（滤波器）和交流耦合电路。

学习完本节内容，应该能够

- 描述 RC 电路的基本应用；
- 讨论 RC 电路在振荡器中如何应用；
- 讨论 RC 电路作为滤波器如何工作；
- 讨论交流耦合。

10.8.1　移相振荡器

我们知道，根据 R 和 C 的数值及信号频率，串联 RC 电路的输出电压将有一定量的相移，这一取决于频率的相移能力在某些反馈振荡电路中是不可缺少的。振荡器是一种产生周期性波形的电路，是许多电子系统中的主要电路。振荡器将在器件课程中学习，所以我们这里的关注点在于移相 RC 电路的应用，要求将振荡器输出端的一部分以适当的相位返回到输入端（称为反馈），以加强输入并维持振荡。一般来说，要求反馈信号总的相移为180°。

单个RC电路的相移小于90°，10.3节中讨论的基本RC滞后电路可以“堆叠”起来，形成复杂的RC网络，如图10-44所示，图中的具体电路称为移相振荡器。移相振荡器通常使用三个参数相同的RC电路在某个特定频率产生所需的180°相移，这一频率就是振荡器的工作频率。放大器的输出由RC网络进行移相并返回到放大器输入端，放大器提供足够的增益以保持振荡。

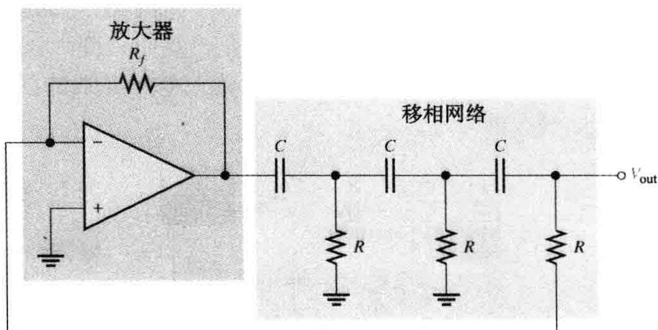


图10-44 移相振荡器

把多个RC电路放在一起的过程中会有负载效应，所以整体相移不能简单地将各个RC电路的相移相加。该电路的详细计算涉及很多烦琐的相量数学，但结果却相当简单。同样参数元件组成的三节RC移相网络，产生180°相移的频率由下面的公式给出：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$$

这也说明RC网络将放大器输出的信号衰减（降低）了29倍，放大器必须弥补这种衰减，应具有−29的增益（负号考虑了相移）。

【例10-16】 在图10-45中，计算输出频率。

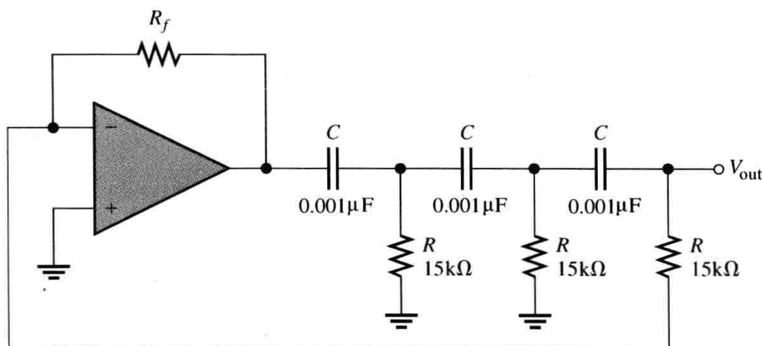


图 10-45

解：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}\times 15\text{k}\Omega\times 0.001\mu\text{F}} = 4.33\text{kHz}$$

相关问题：如果所有电容均变为0.0027μF，试问振荡频率是多少？

10.8.2 RC电路作为滤波器

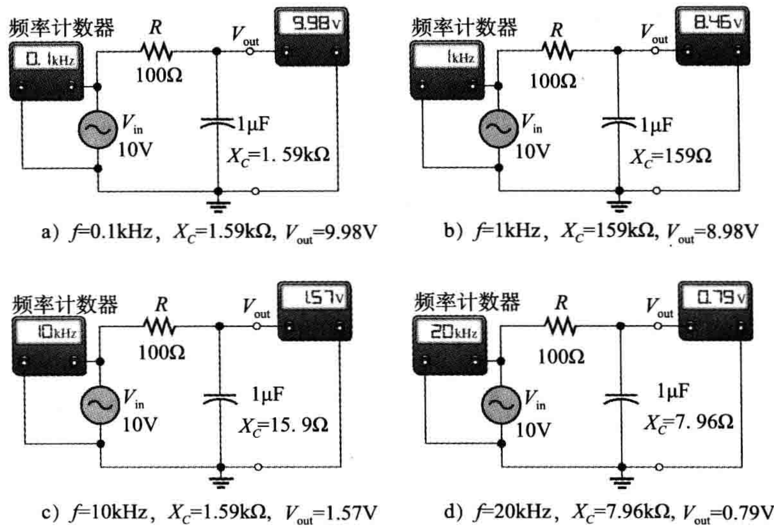
频率选择电路（滤波器）只允许某些频率信号从输入传输到输出，而阻止其他所有信号通过，也就是说，理想情况下除了所选择的频率其他频率都被滤除了。频率选择电路在许多系统特别是通信系统中非常重要。

串联RC电路表现频率选择特性有两种情况：第一种是低通电路，通过在电容两端输出实现，就像滞后电路一样。第二种是高通电路，通过在电阻两端输出实现，就像超前电路一样。在实践中，RC电路与运算放大器联合使用构成有源滤波器，比无源RC电路的效率要高得多。

低通滤波器 前面我们已经学习了串联RC滞后电路输出电压和相位角的变化，为了说明

串联RC电路的滤波作用，我们将输出电压的幅度作为频率的函数。

图10-46用一特定系列的测量显示了串联RC电路的滤波作用，频率从100Hz开始步进增至20kHz，对每个频率值测量输出电压。我们知道，电容电抗随频率的增高而减小，因而电容器两端的电压降减小，而整个过程中输入电压都维持在恒定的10V。表10-1是电路参数随频率的变化情况的汇总。



a) f=0.1kHz, X_C=1.59kΩ, V_{out}=9.98V　b) f=1kHz, X_C=159kΩ, V_{out}=8.98V

c) f=10kHz, X_C=1.59kΩ, V_{out}=1.57V　d) f=20kHz, X_C=7.96kΩ, V_{out}=0.79V

图10-46　低通滤波作用举例，随频率的增高V_{out}减小

图10-46中低通RC电路的频率响应如图10-47所示，这里将测量值绘制成V_{out}对f的曲线图，用平滑曲线连接各点，该图称为响应曲线。该曲线图说明，频率较低时输出电压较大，随着频率的增高输出电压减小。图中频率采用对数刻度。

表 10-1

f/kHz	X_C/Ω	Z_{tot}/Ω	I/mA	V_{out}/V
0.1	1590	1590	6.29	9.98
1	159	188	53.2	8.46
10	15.9	101	99.0	1.57
20	7.96	100	100	0.79

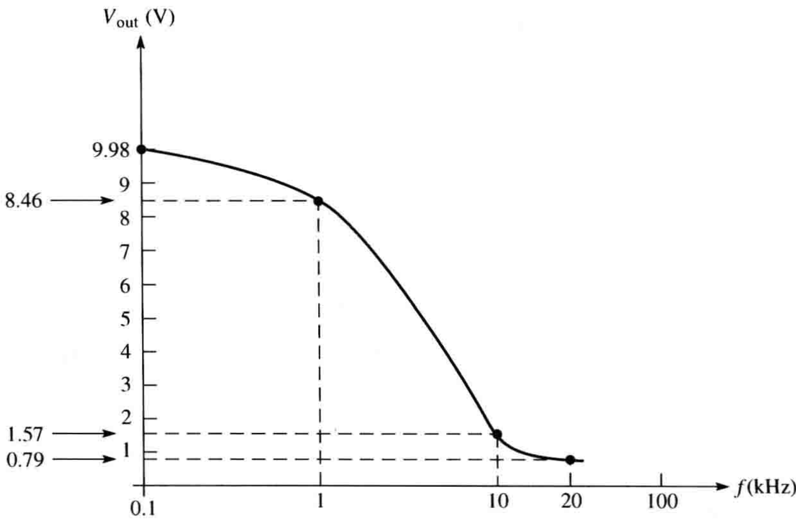


图10-47　图10-46中低通RC电路的频率响应曲线

高通滤波器 为了说明 RC 的高通滤波作用，图 10-48 显示了一个特定的系列测量，频率从 10Hz 开始步进增至 10kHz。我们知道，电容电抗随频率的增高而减小，因而输入电压中更多部分降在了电阻两端，表 10-2 是电路参数随频率的变化情况的汇总。

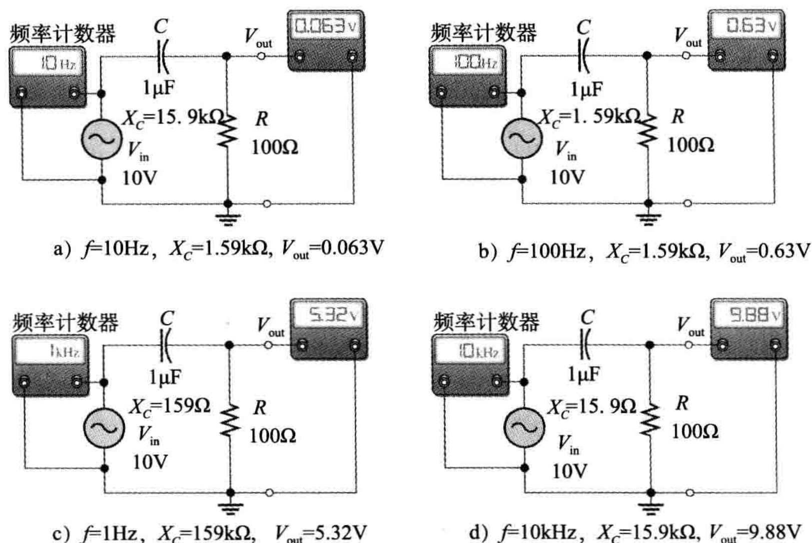


图 10-48 高通滤波作用举例，随频率的增高 V_{out} 增大

表 10-2

f/kHz	X_C/Ω	Z_{tot}/Ω	I/mA	V_{tot}/V	f/kHz	X_C/Ω	Z_{tot}/Ω	I/mA	V_{tot}/V
0.01	15 900	15 900	0.629	0.063	1	159	188	53.2	5.32
0.1	1590	1593	6.28	0.63	10	15.9	101	98.8	9.88

在图 10-49 中，图 10-48 中高通 RC 电路的测量值绘制成该电路的频率响应曲线。可以看到，频率较高时输出电压较大，随着频率的降低输出电压减小。图中频率采用对数刻度。

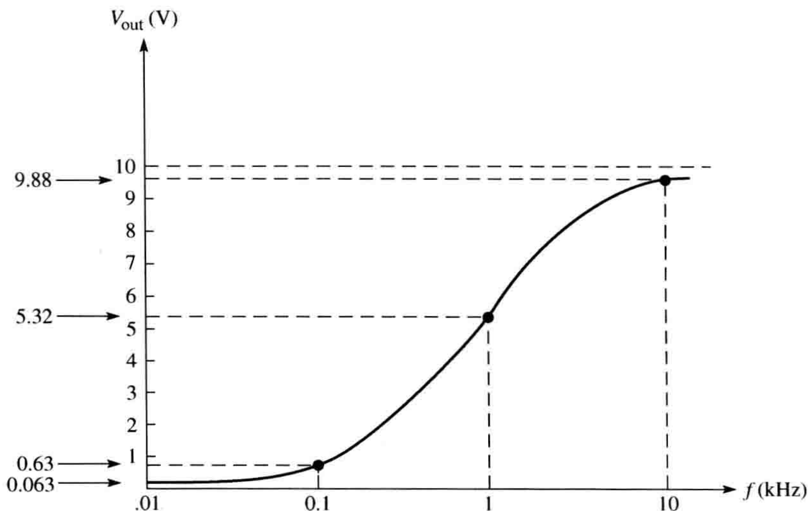


图 10-49 图 10-48 中高通 RC 电路的频率响应曲线

RC电路的截止频率与带宽 在低通或高通 RC 电路中，电容电抗等于电阻的频率称为截止频率，记为 f_c。该条件表示为 $1/(2\pi f_c C) = R$，解出 f_c 得下面公式：

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{10-29}$$

在截止频率 f_c 处，RC 电路的输出电压是其最大值的 70.7%，标准的做法是将截止频率当做电路通过或拒绝频率性能的限制值。例如，对于高通电路，认为所有 f_c 以上的频率都能从输入传递到输出，而所有低于 f_c 的频率都被抑制，低通电路的情况正好相反。

能够从电路输入端传递到输出端的信号频率范围称为带宽，图 10-50 说明了低通电路的带宽与截止频率。

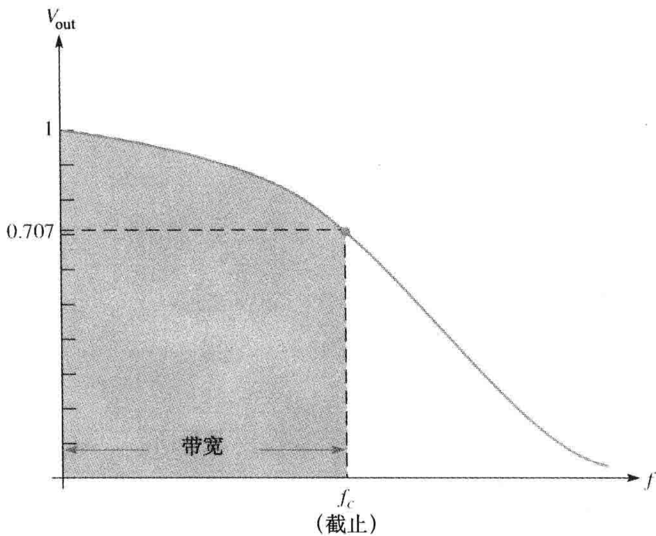


图 10-50 说明截止频率与带宽的低通 RC 电路归一化频率响应曲线

10.8.3 将交流信号耦合进入直流偏置电路

图 10-51 显示一个用于建立交流电压与直流电压电平叠加的 RC 电路，这种电路常用于放大器中，放大器正常工作需要合适的直流偏置电压，被放大的信号电压通过电容耦合并叠加到直流电平上，电容阻止了信号源低内阻对偏置电压的影响。该电路类似于系统举例 10-1 中的电路，但这里是采用分压器来建立所需的偏置电压。

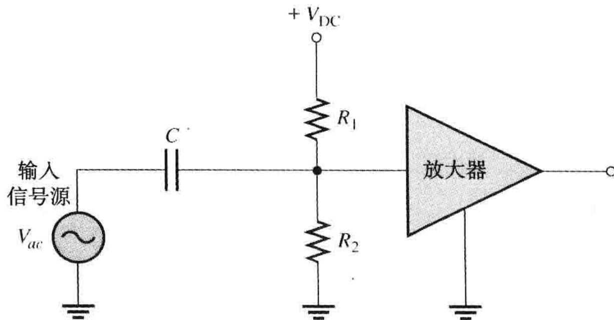
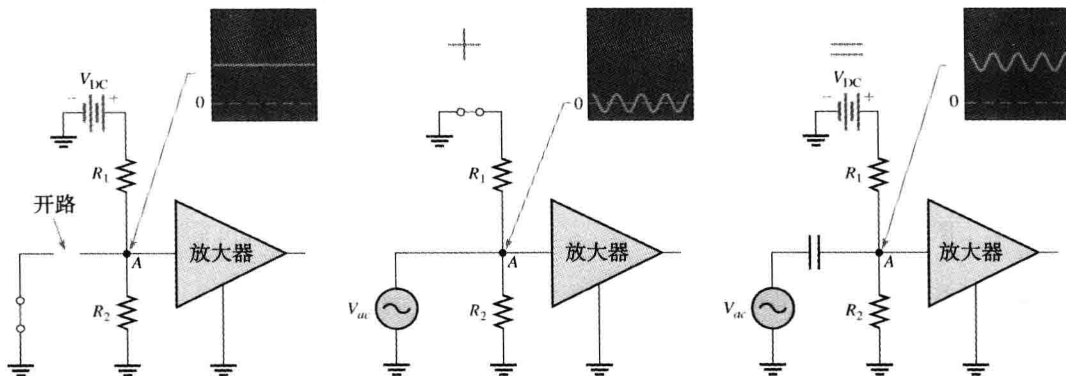


图 10-51 放大器偏置与信号耦合电路

在这类应用中，所选择的电容相对较大，以使在所放大的频率，电抗相对于偏置电路电阻都非常小。当电抗非常小时（理想情况为零），不存在相移，电容上没有信号电压降，因此，所有信号电压都能从信号源进入放大器输入端。

图 10-52 演示了图 10-51 所示的电路叠加原理的应用。图 10-52a 中，交流

信号源被从电路中有效地移除，用短路代替来表示其理想的内阻。由于电容 C 对直流开路，所以 A 点电压由 R_1、R_2 和直流电压源构成的分压器确定。



a) 直流等效：交流电源替换为短路，C对直流开路，R_1和R_2构成直流分压器

b) 交流等效：直流电源替换为短路，C对交流开路，所有V_{ac}均耦合到A点

c) 直流+交流：电压在A点叠加

图 10-52 RC 偏置与耦合电路中直流与交流电压的叠加

在图 10-52b 中，直流电源被从电路中有效地移去，并用短路代替其理想的内阻。因为电容 C 对交流信号频率表现为短路，信号电压直接耦合到 A 点，呈现在 R_1 和 R_2 并联组合两端。图 10-52c 演示了直流电压和交流电压叠加的组合效应，结果信号电压“骑”在直流电平上。

本节测试题

1. 试问在移相振荡器中 RC 电路必须提供多少度的总相移？
2. 为了得到串联 RC 电路的低通特性，输出应该从哪个元件两端取出？

10.9 故障排除

通常元件故障或退化都会对基本 RC 电路的响应产生影响。故障排除的 APM 方法（分析、规划和测量）可用于电路中存在问题的定位。

学习完本节内容，应该能够

- 对 RC 电路进行故障排除；
- 发现开路电阻；
- 发现开路电容；
- 发现短路电阻；
- 发现短路电容。

开路电阻的影响 开路电阻对基本串联 RC 电路工作的影响很容易发现，如图 10-53 所示。显然，由于没有电流通路，所以电容器电压保持为零，而总电压 V_S 全部加在开路电阻两端。

开路电容的影响 当电容开路时，电路中没有电流流过，所以电阻电压降为零，总电压全部加在开路电容两端，如图 10-54 所示。

短路电容的影响 当电容短路时，它两端的电压为零，电流等于 V_S/R，总电压全部加在电阻两端，如图 10-55 所示。

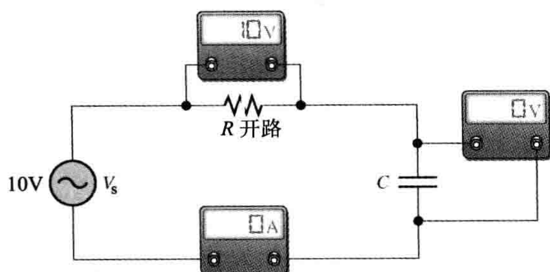


图 10-53 开路电阻的影响

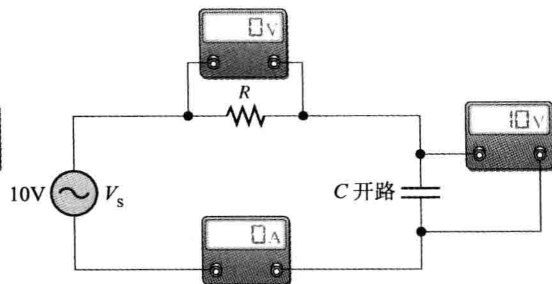


图 10-54 开路电容的影响

漏电电容的影响 当电容存在较高的漏电电流时，漏电电阻将有效地与电容并联，如图 10-56a 所示。若漏电电阻与电路电阻数值相当，电路响应将受到严重影响。可将从电容向电源看进去的电路戴维南化，如图 10-56b 所示。戴维南等效电阻为 R 并联 R_{leak}（电源表现为短路），戴维南等效电压由 R 与 R_{leak} 的分压确定。

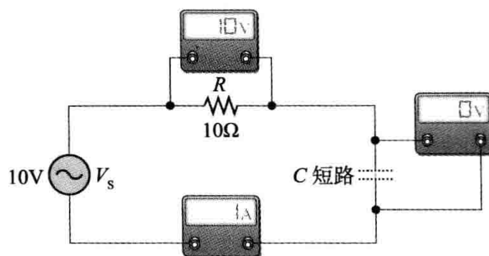


图 10-55 短路电容的影响

$$R_{\text{th}} = R \parallel R_{\text{leak}} = \frac{RR_{\text{leak}}}{R + R_{\text{leak}}}$$

$$V_{\text{th}} = \left(\frac{R_{\text{leak}}}{R + R_{\text{leak}}}\right) V_{\text{in}}$$

可以看出，由于 $V_{\text{th}} < V_{\text{in}}$，所以电容将要充电的电压减小了，而电路的电流却增大了。戴维南等效电路如图 10-56c 所示。

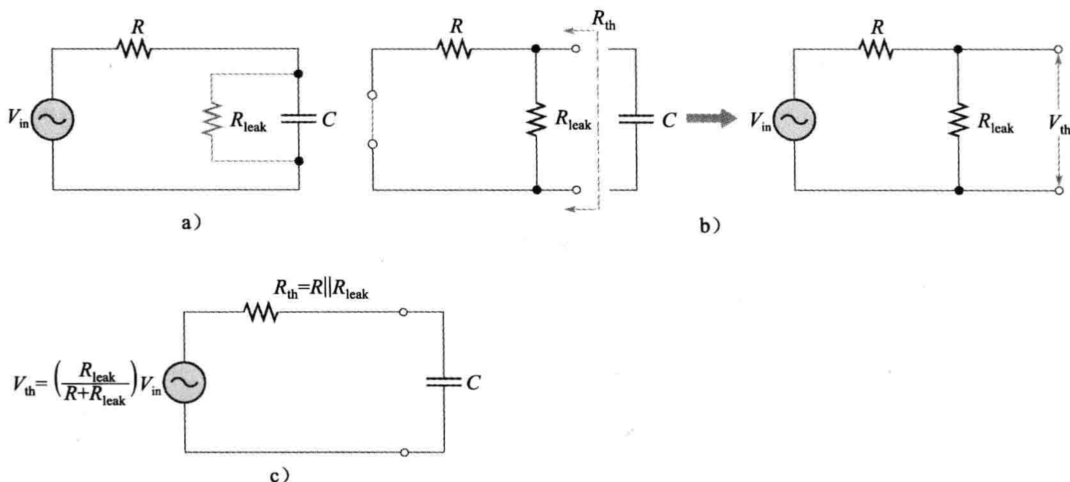


图 10-56 漏电电容的影响

小贴士 有些万用表具有 1kHz 或更低这样相对低的频率响应，而有些则能测量高达 2MHz 的电压或电流。工作中应经常检查，确保所用仪器能够在工作的特定频率进行精确测量。

【例 10-17】 假设图 10-57 中的电容已经退化，其漏电阻为 10kΩ。试确定从输入到输出的相移和退化状态下的输出电压。

解：电路的有效电阻为

$$R_{th}=\frac{RR_{leak}}{R+R_{leak}}=\frac{4.7k\Omega\times10k\Omega}{14.7k\Omega}=3.2k\Omega$$

相位滞后为

$$\phi=90^\circ-\arctan\left(\frac{X_C}{R_{th}}\right)=90^\circ-\arctan\left(\frac{5.0k\Omega}{3.2k\Omega}\right)=32.6^\circ$$

为了求输出电压，首先计算戴维南等效电压

$$V_{th}=\left(\frac{R_{leak}}{R+R_{leak}}\right)V_{in}=\frac{10k\Omega}{14.7k\Omega}\times10V=6.80V$$

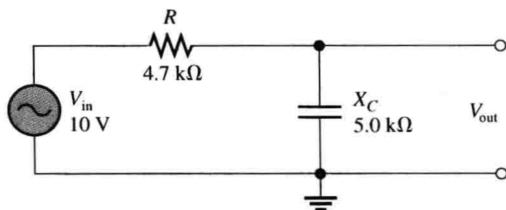


图 10-57

$$V_{out}=\left(\frac{X_C}{\sqrt{R_{th}^2+X_C^2}}\right)V_{th}=\frac{5.0k\Omega}{\sqrt{(3.2k\Omega)^2+(5.0k\Omega)^2}}\times6.8V=5.73V$$

相关问题：如果电容没有漏电，试问输出电压是多少？

其他故障排除考虑

很多时候，正常工作的电路出现故障并不是由于元件故障。接线松散、接触不好或坏焊点都可能导致开路，线头或焊接飞溅可能造成短路。像不插电源或不接函数发生器这样简单的事情也经常发生。电路中参数错误（例如，不正确的电阻值）、函数发生器设定错误频率或错误的输出端连接都可能导致电路工作不正常。

当电路出现问题时，总是应检查仪器是否正确接到电路和电源插座，还要寻找明显的事情，如损坏或松散的连接、连接器未完全插入、线头或焊锡渣等可能造成短路的东西。

问题的关键是，当电路不能正常工作时，应当考虑所有的可能性，而不只是元件的故障。下面的例子用一个简单电路说明使用 APM（分析、规划和测量）方法的过程。

小贴士 在面包板上作电路连接时，应始终采用标准的通用连接，如信号、电源电压和地面的颜色。例如，可使用绿线作信号连线，红线为电源电压，接地线用黑线。这样有助于在线路连接和故障排除过程中的识别。

【例 10-18】 图 10-58 所示的原理图表示的电路在电容两端没有输出电压，预期在输出端应该有 7.4V 电压，电路的物理连接在面包板上完成，试利用故障排除技术找出问题。

解：应用 APM 方法作故障排除。

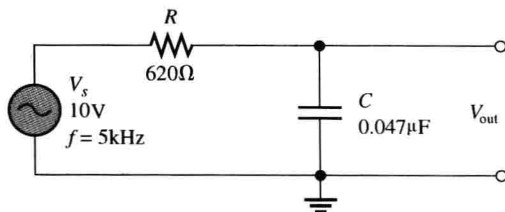


图 10-58

分析：首先思考电路没有输出电压的可能原因。

1）没有电源电压或频率太高以至电容电抗几乎为零。

2）输出端有短路。要么电容内部短路要么存在某些物理短路。

3）电源与输出之间存在开路，阻止了电流而使输出电压为零。可能是电阻开路，或导电路径因损坏而开路，或者连接线松脱，或者面包板接触不好。

4）元件参数值不正确，电阻太大以至于电流及输出电压可以忽略，电容太大以至于其电抗在输入频率近似为零。

规划：先决定做一些视觉检查，如函数发生器电源线未插好或频率设定在一个不正确的值。此外，破损导线、短路的引线以及不正确电阻色码或电容标签往往可以通过目测发现。目视检查如果没有发现问题，那么将通过电压测量来追踪问题的原因。可以使用数字示波器和数

字万用表进行测量。

测量：假设发现函数发生器已插上电源且频率设置正确，目视检查也没有发现可见的开路或短路，元件参数值也正确。

测量过程的第一步是用示波器检查电源电压。假设在电路输入端观察到5kHz频率10V有效值的正弦波，如图10-59a所示，输入电压正常，因此第一种可能的原因被排除。

接下来，检查电容是否短路。断开电源，将数字万用表跨接在电容两端（设置成欧姆挡），如果电容是好的，它对直流开路，短暂充电后电表显示OL（过载），如图10-59b所示。第二个可能的原因已经排除。

由于电压已经在输入端和输出端之间的某处“丢失”，现在必须寻找电压。重新连接电源，用数字万用表（设置在电压挡）测量电阻两端的电压。电阻器两端的电压是零，这意味着没有电流，表明在电路中某处有开路。

现在从输出开始向电源方向跟踪电路查找电压（也可以从电源开始正向查找），可以使用示波器或数字万用表，现决定使用万用表，一根引线连接到地，另一根用于探测电路。如图10-59c所示，测电阻器右边引线①点的电压读数为零，已经测得电阻两端的电压为零，所以电阻左边引线②点的电压如万用表指示的必然为零。其次，移动电表探头到③点，读数为10V，找到了电压。由于电阻左边引线为零电压，而在③点有10V电压，说明面包板上插引线的两个孔中有一个接触是坏的，可能是接触头小又插入太深或电路导线弯曲、折断导致接触故障。

将电阻器引线之一或两者重新插入同一排的其他孔。假设当电阻器引线被移动到正上方的孔时，得到了电路的输出电压（电容器两端的）。

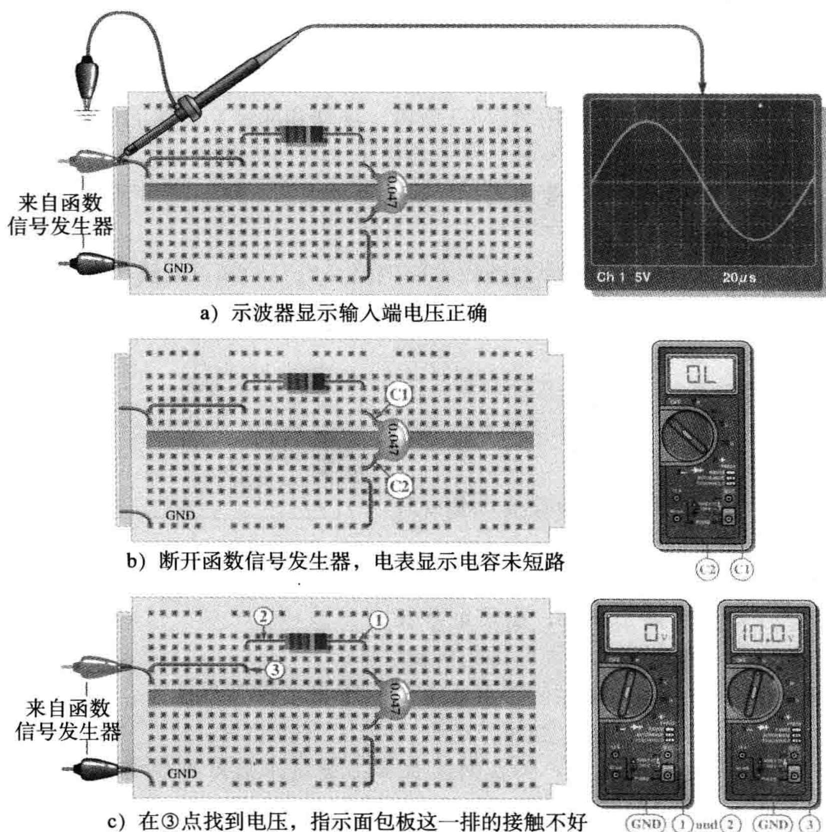


图 10-59

相关问题：假设在检查电容之前，测得电阻两端的电压为 10V，试问这表明什么？

本节测试题

1. 描述漏电电容对 RC 电路直流响应的影响。
2. 在串联 RC 电路中，如果所有电压都加在了电容两端，试问这是什么问题？
3. 试问什么故障会导致串联 RC 电路中电容两端的电压为 0V？

本章小结

- 当正弦电压加到 RC 电路时，电流及所有电压降都同样是正弦波。
- 串联或并联 RC 电路的电流总是超前于电源电压。
- 电阻电压总是与电流同相位。
- 电容电压总是滞后于电流 90°。
- 在 RC 电路中，阻抗由电阻和电容电抗组合确定。
- 阻抗为欧姆为单位表示。
- 电路的相位角是总电流与电源电压之间的角度。
- 串联 RC 电路的阻抗与频率成反比。
- 串联 RC 电路的相位角（θ）与频率成反比。
- 在 RC 滞后电路中，输出电压滞后于输入电压。
- 在 RC 超前电路中，输出电压超前于输入电压。
- 电路的阻抗可以通过测量电源电压和总电流然后应用欧姆定律来确定。
- 在 RC 电路中，部分功率是电阻性的，部分是电抗性的。
- 电阻性功率（有功功率）和无功功率的相量组合称为视在功率。
- 视在功率用伏安（VA）表示。
- 功率因数（*PF*）表明视在功率中有多少是有功功率。
- 功率因数为 1 代表纯电阻电路，功率因数为 0 代表纯电抗电路。
- 在具有频率选择性的电路中，某些频率被传递到输出，而其他频率则被抑制。

关键术语

导纳（Admittance，*Y*） 有抗电路允许电流通过能力的度量，为阻抗的倒数，单位是西门子（S）。

视在功率（Apparent power，P_a） 电阻性功率（有功功率）和无功功率的相量组合，单位是伏安（VA）。

带宽（Bandwidth） 能够从电路输入端传递到输出端的信号频率范围。

电容电纳（Capacitive susceptance，B_C） 电容允许电流通过的能力度量，是电容电抗的倒数，单位是西门子（S）。

截止频率 Cutoff frequency） 滤波器输出电压等于最大输出电压 70.7%所对应的频率。

频率响应（Frequency response） 电路中特定频率范围内输出电压（或电流）的变化。

阻抗（Impedance，*Z*） 对正弦电流的总阻碍，用欧姆表示。

相位角（Phase angle） 在有抗电路中电源电压与总电流之间的角度。

功率因数（Power factor） 伏安与有功功率或瓦特之间的关系。伏安乘以功率因数等于有功功率。

***RC* 滞后电路（lag circuit）** 一种电容两端的输出电压滞后于输入电压一个特定角度的移相电路。

***RC* 超前电路（lead circuit）** 一种电阻两端的输出电压超前于输入电压一个特定角度的移相电路。

关键公式

(10-1)	$Z=\sqrt{R^2+X_C^2}$	串联 RC 的阻抗
(10-2)	$\theta=\arctan\left(\frac{X_C}{R}\right)$	串联 RC 的相位角
(10-3)	$V=IZ$	欧姆定律
(10-4)	$I=\frac{V}{Z}$	欧姆定律
(10-5)	$Z=\frac{V}{I}$	欧姆定律

(10-6)	$V_S = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$	串联RC电路的总电压
(10-7)	$\theta = \arctan\left(\frac{V_C}{V_R}\right)$	串联RC的相位角
(10-8)	$\phi = 90° - \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right)$	滞后电路的相位角
(10-9)	$V_{out} = \left(\frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{in}$	滞后电路的输出电压
(10-10)	$\phi = \arctan\left(\frac{X_C}{R}\right)$	超前电路的相位角
(10-11)	$V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}\right)V_{in}$	超前电路的输出电压
(10-12)	$Z = \frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$	并联RC阻抗
(10-13)	$\theta = \arctan\left(\frac{R}{X_C}\right)$	并联RC相位角
(10-14)	$G = \frac{1}{R}$	电导
(10-15)	$B_C = \frac{1}{X_C}$	电容电纳
(10-16)	$Y = \frac{1}{Z}$	导纳
(10-17)	$Y_{tot} = \sqrt{G^2 + B_C^2}$	总导纳
(10-18)	$V = \frac{I}{Y}$	欧姆定律
(10-19)	$I = VY$	欧姆定律
(10-20)	$Y = \frac{I}{V}$	欧姆定律
(10-21)	$I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$	并联RC电路的总电流
(10-22)	$\theta = \arctan\left(\frac{I_C}{I_R}\right)$	并联RC相位角
(10-23)	$\theta = \left(\frac{\Delta t}{T}\right)360°$	利用时间测量的相位角
(10-24)	$P_{true} = I_{tot}^2 R$	有功功率（W）
(10-25)	$P_r = I_{tot}^2 X_C$	无功功率（VAR）
(10-26)	$P_a = I_{tot}^2 Z$	视在功率（VA）
(10-27)	$P_{true} = V_S I_{tot} \cos\theta$	有功功率
(10-28)	$PF = \cos\theta$	功率因数
(10-29)	$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$	RC电路的截止频率

是非测验题

1. 串联RC电路中，当频率增高时阻抗增大。
2. 串联RC滞后电路中，输出电压取自电阻两端。
3. 导纳是电纳的倒数。
4. 并联RC电路中，频率增高时，电导不变。
5. RC电路的相位角在电源电压与电流之间测量。
6. 在相量运算中应用积除以和规则可求得并联RC电路的阻抗。
7. 如果 $X_C=R$，串联RC电路的相移是电流超前于电压45°。
8. 功率因数等于相位角的正切。
9. 纯电阻电路的功率因数为0。
10. 视在功率以瓦特计量。

自测题

1. 串联 RC 电路中，电阻两端的电压
   (a) 与电源电压同相位
   (b) 滞后于电源电压 90°
   (c) 与电流同相位
   (d) 滞后于电流 90°
2. 串联 RC 电路中，电容两端的电压
   (a) 与电源电压同相位
   (b) 滞后于电阻电压 90°
   (c) 与电流同相位
   (d) 滞后于电源电压 90°
3. 当加到串联 RC 电路的电压频率增高时，阻抗
   (a) 增大　　(b) 减小
   (c) 保持不变　　(d) 加倍
4. 当加到串联 RC 电路的电压频率降低时，相位角
   (a) 增大　　(b) 减小
   (c) 保持不变　　(d) 变得不稳定
5. 串联 RC 电路的频率和电阻均加倍，阻抗
   (a) 加倍　　(b) 减半
   (c) 四倍　　(d) 没有数值不能确定
6. 串联 RC 电路中，测得电阻两端电压有效值为 10V，电容两端也测得 10V 有效值电压，电源电压有效值为
   (a) 20V　　(b) 14.14V
   (c) 28.28V　　(d) 10V
7. 第 6 题中电压是在某一频率测得的，为使电阻电压大于电容电压，则频率
   (a) 必须增高　　(b) 必须降低
   (c) 保持不变　　(d) 没有影响
8. 当 $R=X_C$ 时，相位角是
   (a) 0°　　(b) +90°
   (c) −90°　　(d) 45°
9. 为将相位角降至 45°以下，下列条件必须成立
   (a) $R=X_C$　　(b) $R<X_C$
   (c) $R>X_C$　　(d) $R=10X_C$
10. 电源电压的频率增高时，并联 RC 电路的阻抗
    (a) 增大　　(b) 减小
    (c) 不变
11. 并联 RC 电路中，流过电阻支路的电流有效值为 1A，流过电容支路的电流有效值也为 1A，则总电流的有效值为
    (a) 1A　　(b) 2A
    (c) 2.28A　　(d) 1.414A
12. 功率因数为 1 表示电路相位角为
    (a) 90°　　(b) 45°
    (c) 180°　　(d) 0°
13. 某个负载的有功功率为 100W，无功功率为 100var，则视在功率为
    (a) 200V·A　　(b) 100V·A
    (c) 141.4V·A　(d) 141.4W
14. 能源通常定额为
    (a) 瓦特　　(b) 伏安
    (c) 乏　　(d) 以上都不是
15. 若某低通滤波器的带宽为 1kHz，则截止频率为
    (a) 0Hz　　(b) 500Hz
    (c) 2kHz　　(d) 1000Hz

故障排除：征兆与原因

参考图 10-60，给每一组征兆确定原因。

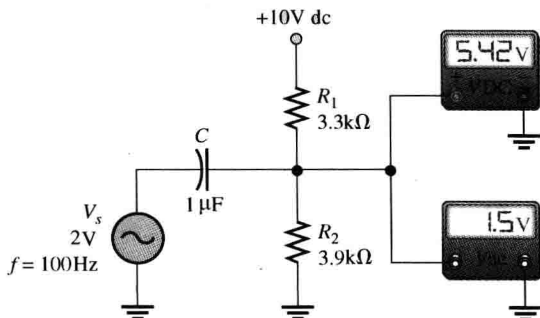


图 10-60　电表指示电路的正确读数

1. 征兆：直流电压表读数为 0V，交流电压表读数为 1.85V。
   原因：(a) C 短路
   (b) R_1 开路
   (c) R_2 开路
2. 征兆：直流电压表读数为 5.42V，交流电压表读数为 0V。
   原因：(a) C 短路
   (b) C 开路
   (c) 一个电阻开路
3. 征兆：直流电压表读数为 0V，交流电压表读数

为2V。

原因：(a) C短路

(b) C开路

(c) R_1短路

4. 征兆：直流电压表读数为10V，交流电压表读数为0V。

原因：(a) C开路

(b) C短路

(c) R_1短路

5. 征兆：直流电压表读数为10V，交流电压表读数为1.8V。

原因：(a) R_1短路

(b) R_2开路

(c) C短路

习题

基本习题

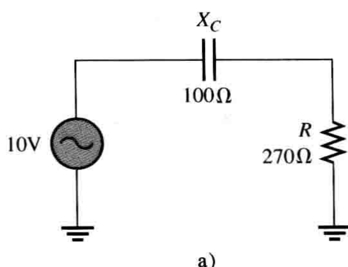
10.1节

1. 8kHz正弦电压加到串联RC电路，试问电阻两端电压的频率是多少？电容两端呢？

2. 第1题中电路的电流波形是什么？

10.2节

3. 求图10-61中各个电路的阻抗。



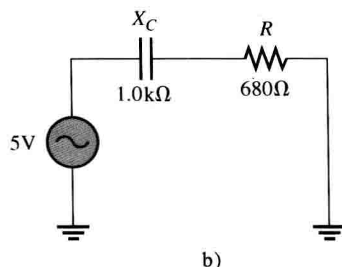
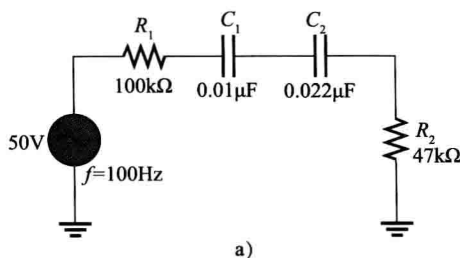


图　10-61

4. 求图10-62中各个电路的阻抗及相位角。



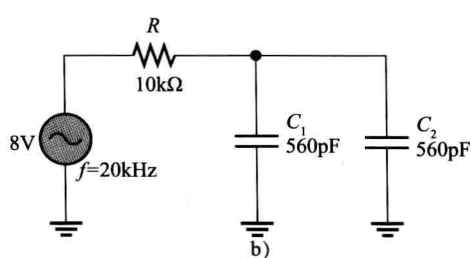


图　10-62

5. 对图10-63中的电路，求下列各频率时的阻抗。

(a) 100Hz　　(b) 500Hz

(c) 1.0kHz　　(d) 2.5kHz

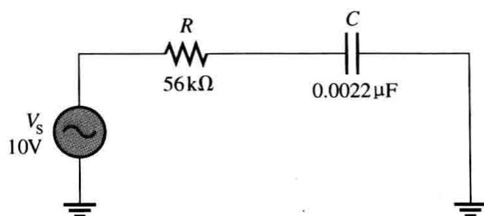


图　10-63

6. 对$C=0.0047\mu F$，重复第5题。

10.3节

7. 计算图10-61中的各个电路的总电流。

8. 对图10-62中的电路重复第7题。

9. 对于图10-64中的电路，画出显示所有电压和总电流的相量图，标出相位角。

10. 对于图10-65中的电路，求下列各量

(a) Z　　(b) I

(c) V_R　　(d) V_C

μ

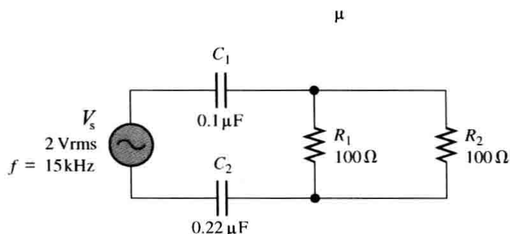


图 10-64

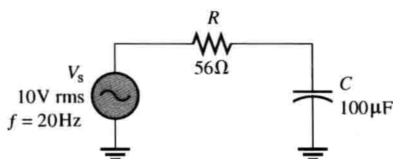


图 10-65

11. 在图 10-66 中，为了使总电流为 10mA，变阻器必须设置在何值？结果相位角是多少？

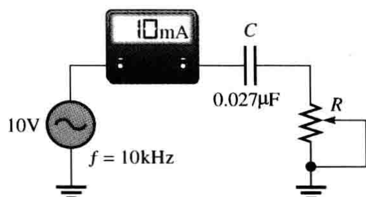


图 10-66

12. 对于图 10-67 中的滞后电路，求下列频率时输入电压与输出电压之间的相位滞后。
    (a) 1Hz (b) 100Hz
    (c) 1.0kHz (d) 10kHz
13. 对图 10-68 中的超前电路，重复第 12 题。

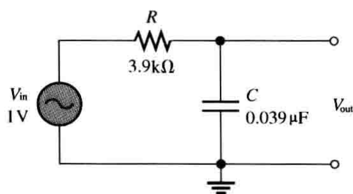


图 10-67

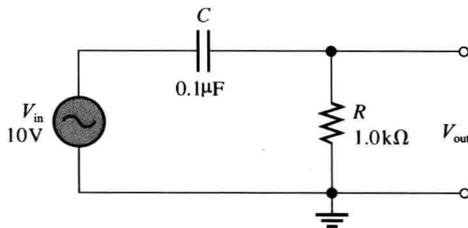


图 10-68

10.4 节

14. 求图 10-69 中电路的阻抗。
15. 求图 10-70 中电路的阻抗及相位角。

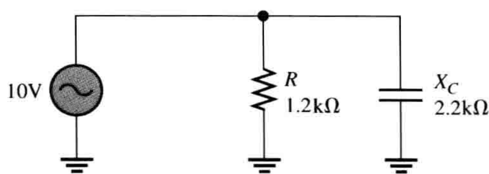


图 10-69

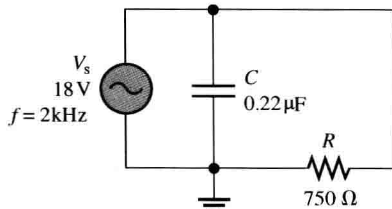


图 10-70

16. 对下列频率，重复第 15 题。
    (a) 1.5kHz
    (b) 3.0kHz
    (c) 5.0kHz
    (d) 10kHz
17. 求图 10-71 中电路的阻抗及相位角。

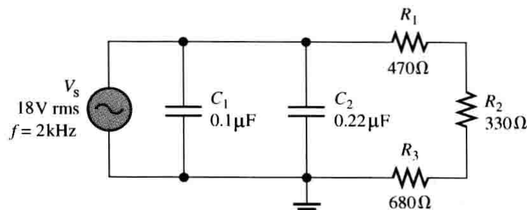


图 10-71

10.5 节

18. 对于图 10-72 中的电路，求所有电流和电压。
19. 对于图 10-73 中的并联电路，求每条支路的电流和总电流，并求电源电压与总电流之间的相位角。

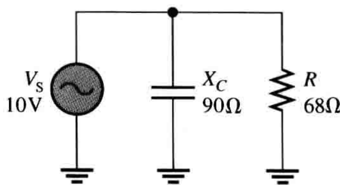


图 10-72

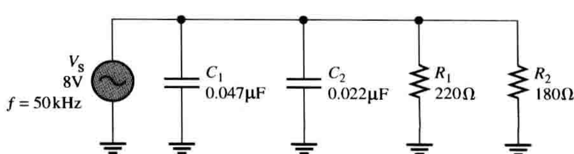


图 10-73

20. 对于图10-74中的电路，求下列各量。
    (a) Z (b) I_R (c) I_C
    (d) I_{tot} (e) θ
21. 对于$R=4.7k\Omega$、$C=0.047\mu F$、$f=500Hz$，重复第20题。
22. 求图10-75中电路的总电流。

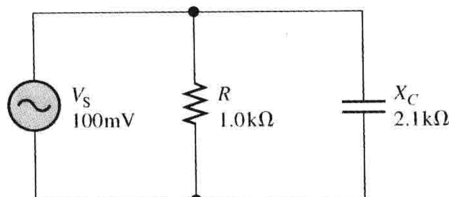


图 10-74

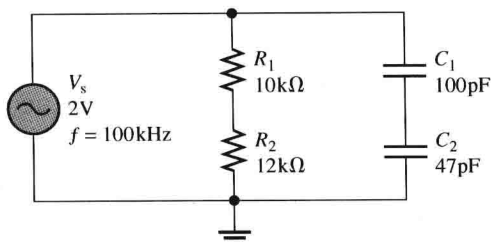


图 10-75

10.6 节

23. 图10-76中的电路是由五个元件组成的复杂电路，根据三角关系可以证明，R_1、R_2、C_2和C_3等效为一个3.08Ω电阻与一个39.5Ω电容电抗串联。根据给定信息，求原始电路各元件两端的电压。
24. 试问图10-76中的电路是电阻性为主还是电容性为主？
25. 求图10-76中流过各支路的电流及总电流。

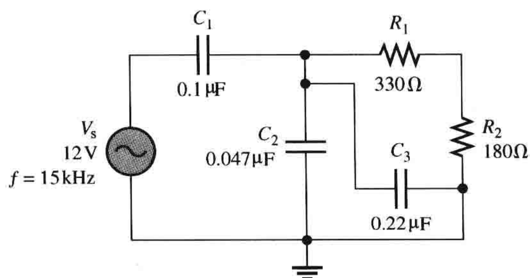


图 10-76

26. 对于图10-77中的电路，求下列各量。
    (a) I_{tot} (b) θ (c) V_{R1}
    (d) V_{R2} (e) V_{R3} (f) V_C

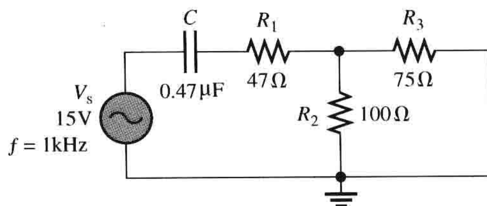


图 10-77

10.7 节

27. 某串联RC电路的有功功率为2W，无功功率为3.5VAR，求视在功率。
28. 试问图10-65中有功功率和无功功率各是多少？
29. 试问图10-75中电路的功率因数是多少？
30. 求图10-77中电路的P_{true}、P_r、P_a和PF，并画出功率三角形。

10.8 节

31. 图10-67中的滞后电路也是一个低通滤波器，通过标绘频率从0Hz开始步进1kHz到10kHz输出电压的变化，画出电路的响应曲线。
32. 画出图10-68中电路的频率响应曲线，频率范围从0Hz到10kHz，步进1kHz。
33. 画出图10-67和图10-68中每个电路的电压相量图，频率为5kHz，V_{in}的有效值为1V。
34. 图10-78中，放大器A输出信号电压有效值为50mV，如果放大器B的输入电阻是10kΩ，试问频率为3kHz时损失在耦合电容（C_c）上的信号有多大？

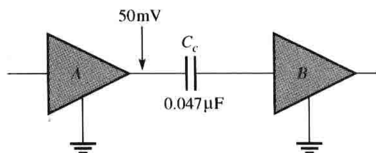


图 10-78

35. 求图10-67和图10-68中每个电路的截止频率。
36. 求图10-68中电路的带宽。

10.9 节

37. 假设图10-79中电容漏电严重，请说明这种退化如何影响输出电压和相位角，假设漏电阻为5kΩ，频率为10Hz。

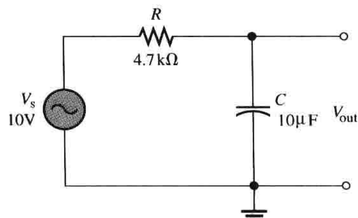
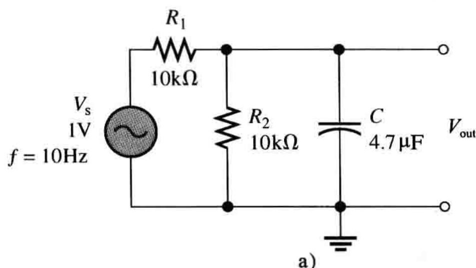


图 10-79

38. 图 10-80 中每个电容都带有一个 2kΩ 的漏电电阻，在此条件下求各个电路的输出电压。



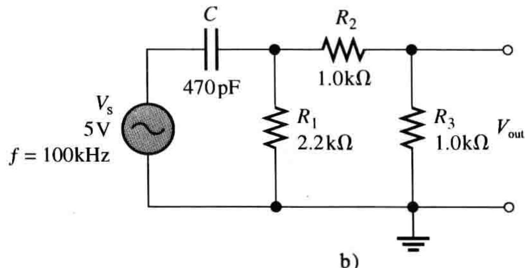


图　10-80

39. 对于下列故障模式，求图 10-80a 中电路的输出电压，并与正确输出比较。
   (a) R_1 开路
   (b) R_2 开路
   (c) C 开路
   (d) C 短路

40. 对于下列故障模式，求图 10-80b 中电路的输出电压，并与正确输出比较。
   (a) C 开路
   (b) C 短路
   (c) R_1 开路
   (d) R_2 开路
   (e) R_3 开路

高级习题

41. 单个 240V、60Hz 的电源驱动两个负载，负载 A 阻抗为 50Ω、功率因数为 0.85，负载 B 阻抗为 72Ω、功率因数为 0.95。
   (a) 每个负载吸取的电流是多少？
   (b) 每个负载的无功功率是多少？
   (c) 每个负载的有功功率是多少？
   (d) 每个负载的视在功率是多少？

42. 图 10-81 中，为使频率为 20Hz 时放大器 2 输入端信号电压至少为放大器 1 输出信号电压的 70.7%，试问所需的耦合电容值是多少？不考虑放大器的输入电阻。

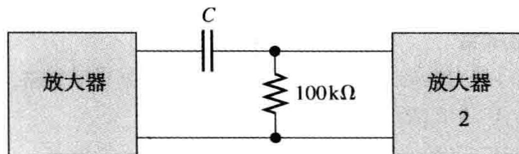


图　10-81

43. 在图 10-82 中，求使电源电压与总电流之间相位角为 30°时所需的 R_1 值。

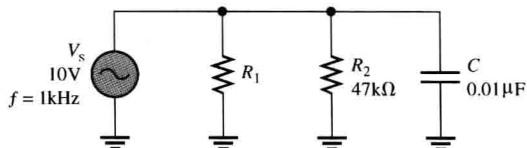


图　10-82

44. 画出系统举例 10-1（见图 10-24）在 1.59Hz 截止频率时放大器输入电路的阻抗相量图。

45. 某负载消耗 1.5kW 功率，阻抗为 12Ω，功率因数为 0.75，试问无功功率是多少？视在功率是多少？

46. 求图 10-83 方框中满足下列电路需求的串联元件。
   (a) P_{true} = 400W
   (b) 超前功率因数（I_{tot} 超前 V_S）

47. 当 $V_A = V_B$ 时，求图 10-84 中 C_2 的值。

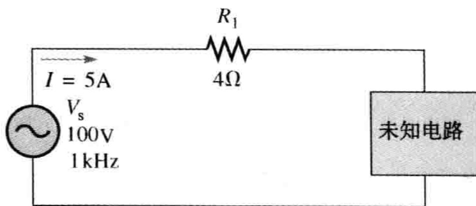


图　10-83

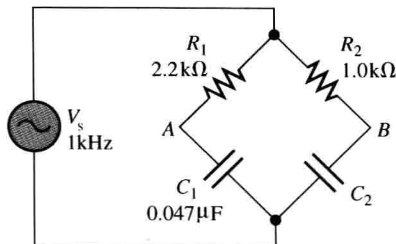
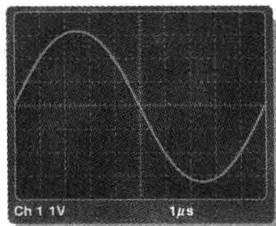
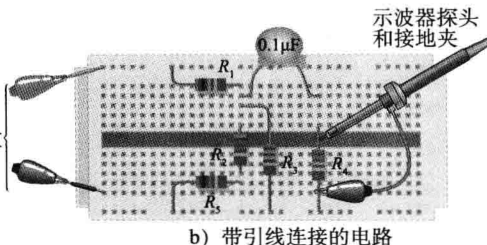


图　10-84

48. 画出图10-85中电路的原理图，确定示波器上的波形是否正确，如果有故障，请识别之。其中，电阻 R_1 的色环颜色分别为：棕、黑、橙、金；电阻 R_2 的色环颜色分别为：灰、红、红、金；电阻 R_3 的色环颜色分别为：棕、灰、橙、金；电阻 R_4 的色环颜色分别为：红、红、橙、金；电阻 R_5 的色环颜色分别为：棕、黑、红、金。



a) 示波器显示



b) 带引线连接的电路

图 10-85

Multisim 仿真故障排除习题

49. 打开文件P10-49，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
50. 打开文件P10-50，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
51. 打开文件P10-51，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
52. 打开文件P10-52，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
53. 打开文件P10-53，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
54. 打开文件P10-54，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
55. 打开Multisim文件P10-55，如图10-38所示移动接地，使用图10-39所示泰克仿真示波器，修改电路以便测量相位移。采用标准触发模式，然后模拟 C_1 短路，确定它对相移的影响。（为了测量准确，需要对放大器复位。）

各节测试题答案

10.1 节

1. V_C频率为60Hz，I频率为60Hz。
2. 电容电抗与电阻。
3. 当 $R>X_C$时，θ靠近0°。

10.2 节

1. 阻抗是对正弦电流的总阻碍，用欧姆表示。
2. V_S滞后于 I。
3. 电容电抗产生相位角。
4. $Z=\sqrt{R^2+X_C^2}=59.9\ \text{k}\Omega$；
   $\theta=\arctan(X_C/R)=56.6°$

10.3 节

1. $V_S=\sqrt{V_R^2+V_C^2}=7.2\text{V}$
2. $\theta=\arctan(V_C/V_R)=56.3°$
3. $\theta=90°$
4. (a) f减小时X_C减小
   (b) f增大时Z减小
   (c) f增大时θ减小
5. $\phi=90°-\arctan(X_C/R)=62.8°$
6. $V_{out}=(R/\sqrt{R^2+X_C^2})V_{in}=8.9\text{V}$

10.4 节

1. $Z=RX_C/\sqrt{R^2+X_C^2}=545\Omega$
2. 电导是电阻的倒数；电容电纳是电容电抗的倒数；导纳是阻抗的倒数。
3. $Y=1/Z=10\text{mS}$
4. $Y=\sqrt{G^2+B_C^2}=24\text{mS}$

10.5 节

1. $I_{tot}=V_SY=21\text{mA}$
2. $\theta=\arctan(I_C/I_R)=56.3°$；
   $I_{out}=\sqrt{I_R^2+I_C^2}=18\text{mA}$
3. $\theta=90°$

10.6 节

1. 所有接地均接到电气公共端可以避免元件短路。
2. $V_1=I_{tot}R_1=6.71\text{V}$
3. 1.67pF

10.7 节

1. 消耗功率的是电阻。
2. $PF=\cos45°=0.707$
3. $P_{true}=I_{tot}^2R=1.32\text{ kW}$；$P_r=I_{tot}^2X_C=1.84\text{ kVAR}$；

$P_a = I_{tot}^2 Z = 2.26\ kVA$

10.8节

1. 180°

2. 电容两端输出。

10.9节

1. 漏电电阻表现为与C并联，它改变了电路的时间常数。

2. 电容开路。

3. 电容短路、电阻开路、没有电源电压、连接断开都可能造成电容两端的电压为0V。

例题中相关问题答案

例10-1 2.42kΩ；65.6°

例10-2 2.56V

例10-3 65.5°

例10-4 7.14V

例10-5 15.9kΩ；86.4°

例10-6 相位滞后ϕ增大。

例10-7 输出电压减小。

例10-8 相位超前ϕ增大，输出电压增大。

例10-9 24.3Ω

例10-10 4.60mS

例10-11 6.16mA

例10-12 117mA；31°

例10-13 V_1=7.04V；V_2=3.21V

例10-14 0.146

例10-15 990μW

例10-16 1.60kHz

例10-17 7.29V

例10-18 电阻开路

是非测验题答案

1.F 2.F 3.F 4.T 5.T 6.T 7.T 8.F 9.F 10.F

自测题答案

1.(c) 2.(b) 3.(b) 4.(a) 5.(d) 6.(b) 7.(a) 8.(d) 9.(c) 10.(b) 11.(d) 12.(d) 13.(c) 14.(b) 15.(d)

故障排除：征兆与原因的答案

1.(b) 2.(b) 3.(a) 4.(c) 5.(b)

第11章
电感器

本章目标

- 描述电感的基本结构与特性；
- 讨论各种类型的电感；
- 分析电感的串联与并联；
- 分析电感性直流开关电路；
- 分析电感性交流电流；
- 讨论电感的应用。

电感是线圈反抗电流变化的性质，电感的基础是任何载有电流的导体周围存在的电磁场。设计成具有电感性质的电气元件称为电感器、线圈，或在某些应用中称为扼流圈，这些术语指的是同一种器件。扼流圈一词通常与阻止高频信号的电感器相关联，广泛用于通信系统和射频电路中。

本章我们将学习基本电感[⊖]及其特点，介绍各类电感的物理结构及其电学性能，讨论电感在直流和交流电路中的工作，分析电感的串联和并联组合。

11.1 基本电感

电感器是一种无源电气元件，由线圈构成，具有电感的性质。

学习完本节内容，应该能够

- 描述电感的基本结构及其特性；
- 定义电感并说明它的单位；
- 讨论感应电压；
- 说明电感如何存储能量；
- 指明影响电感的物理特性；
- 讨论线圈电阻和线圈电容；
- 用法拉第定律和楞次定律解释电感两端的感应电压。

导线绕成线圈就构成了电感，如图 11-1 所示。流过线圈的电流产生电磁场，线圈绕组每一圈（匝）在周围形成的磁力线都与相邻圈有效叠加，在线圈内及周围形成更强的磁场，如图 11-1所示。总磁场的净方向形成了南北两个磁极，电感的电原理符号如图 11-2 所示。

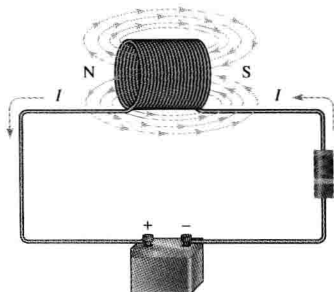


图 11-1　流过线圈的电流产生三维电磁场，电阻限制电流

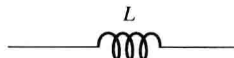


图11-2　电感的符号

11.1.1 电感

当电感中存在电流时，将建立起电磁场。电流改变时，电磁场也将跟着改变，电流增大磁场扩展，电流减小磁场缩减。因此，变化的电流在电感（又称线圈或某些应用中称扼流圈）周

⊖ 中文中，如无理解上的问题，一般将电感器、电感元件、电感性、电感量都简称为电感。——译者注

围形成变化的电磁场。反过来，变化的电磁场在线圈两端产生感应电压以阻碍电流变化，这个性质称为自感，通常简称为电感，用符号 L 表示。

电感是线圈在电流变化时建立感应电压能力的度量，感应电压的方向是阻碍电流变化的方向。

电感的单位　电感的基本单位是亨利，符号为 H。根据定义，当线圈中的电流以每秒一安培的速率变化在线圈两端产生一伏特的感应电压时，线圈的电感为一亨利。亨利是一个很大的单位，所以实际使用中常用的单位是毫亨（mH）和微亨（μH），对于非常小的电感也使用纳亨（nH）作单位。

能量存储　电感将能量存储在电流产生的磁场中，存储的能量可表示为

$$W = \frac{1}{2}LI^2 \tag{11-1}$$

可以看出，存储的能量与电感和电流的平方成正比。电流（I）以安培表示、电感（L）以亨利表示时，能量（W）以焦耳表示。

11.1.2　电感的物理特性

确定线圈电感的重要特征如下：磁心材料的磁导率、线圈匝数、磁心长度和磁心截面积。

磁心材料　正如前面讨论的，电感基本上就是一个线圈。线圈所围绕的材料称为磁心，线圈可绕在任一非磁性或磁性材料上。非磁性材料可以是空气、木材、铜、塑料和玻璃，这些材料的磁导率与真空相同。磁性材料有铁、镍、钢、钴或其合金，这些材料的磁导率是真空磁导率的数百或数千倍以上，归类为铁磁材料。铁磁磁心为磁力线提供了一个较低磁阻的路径，从而允许建立更强的磁场。

正如第 7 章所述，磁心材料的磁导率（μ）决定了建立磁场的容易程度，电感与磁心材料的磁导率成正比。

物理参数　如图 11-3 所示，线圈的匝数、长度和截面积是确定电感值的因素。电感与磁心长度成反比，与截面积成正比。此外，电感还与线圈匝数的平方成正比。电感与这些参数的关系可表示如下：

$$L = \frac{N^2\mu A}{l} \tag{11-2}$$

式中，L 是电感，单位为亨利（H）；N 是线圈匝数；μ 是磁导率，单位为亨利/米（H/m）；A 是截面积，单位为平方米（m^2）；l 是磁心长度，单位为米（m）。

【例 11-1】　求图 11-4 所示线圈的电感。磁心的磁导率为 0.25×10^{-3} H/m。

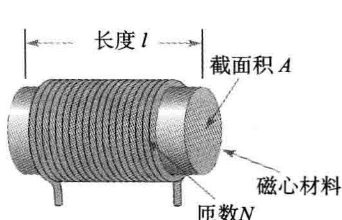


图 11-3　确定线圈电感的因素

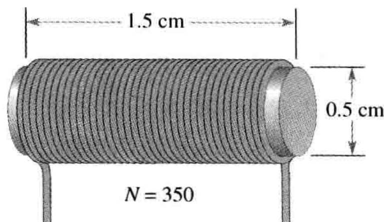


图　11-4

解： 1cm = 0.01m，因此，1.5cm = 0.015m，0.5cm = 0.005m

$$A = \pi r^2 = \pi\times(0.25\times10^{-2}\text{m})^2 = 1.96\times10^{-5}\text{m}^2$$

$$L = \frac{N^2\mu A}{l} = \frac{(350)^2\times(0.25\times10^{-3}\text{H/m})\times(1.96\times10^{-5}\text{m}^2)}{0.015\text{m}} = 40\text{mH}$$

相关问题：磁心长为2cm、直径为1cm，线圈共400匝，磁导率为0.25×10^{-3} H/m，试确定线圈的电感。

11.1.3 线圈电阻

线圈由某种材料制成（如绝缘铜线），导线具有一定的单位长度电阻，多匝导线构成线圈时，总电阻将是可观的。这种固有电阻称为直流电阻或线圈电阻R_W。

虽然这种电阻沿导线长度分布，如图11-5a所示，但是在电路原理图上，有时用一个与线圈电感串联的电阻表示，如图11-5b所示。在许多应用中，可以忽略线圈电阻，将线圈视为理想电感，而在其他情况，则必须考虑该电阻。

11.1.4 线圈电容

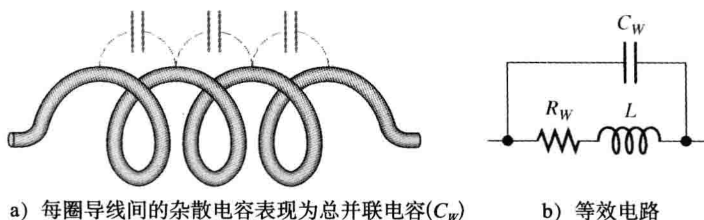


a）导线含沿长度公布的电阻　　b）等效电路

图11-5 线圈的线圈电阻

两个导体并排放置时，它们之间总是存在一定的电容，因此，线圈中多匝导线放置在一起很自然地存在副作用——一定量的杂散电容，称为线圈电容（C_W）。在许多应用中，线圈电容很小，没有显著的影响；而在另一些场合，特别是高频情况，杂散电容会变得很重要。

带有线圈电阻（R_W）和线圈电容（C_W）的电感等效电路如图11-6所示。杂散电容以并联方式作用，每圈线圈之间的杂散电容在电路图上表现为一个与线圈和线圈电阻并联的总电容，如图11-6b所示。



a）每圈导线间的杂散电容表现为总并联电容(C_W)　　b）等效电路

图11-6 线圈的线圈电容

安全提示

操作电感时要小心，因为快速变化的磁场可能感应出很高的电压，当电流被突然切断或数值突然改变时，就会发生这种情况。

11.1.5 法拉第定律复习

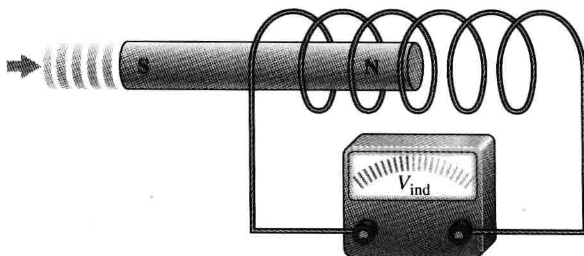


图11-7 变化的磁场产生感应电压

研究电感时第7章介绍的法拉第定律非常重要，这里作一个复习。法拉第发现，通过线圈的磁场运动，将在线圈两端感应出电压，如果提供了闭合的路径，感应电压将产生出感应电流。他观察到线圈中感应出电压的大小与磁场相对于线圈的变化率成正比。这个原理如图11-7所示，其中条形磁铁在线圈内移动。接在线圈两端的电压表指示了感应出的电压，磁铁运动越快，感应电压越大。

当导线绕成一定数目的环或匝并置于变化的磁场中时，线圈两端感应出电压，所感应的电压与线圈的匝数 N 和磁场的变化速率成正比。

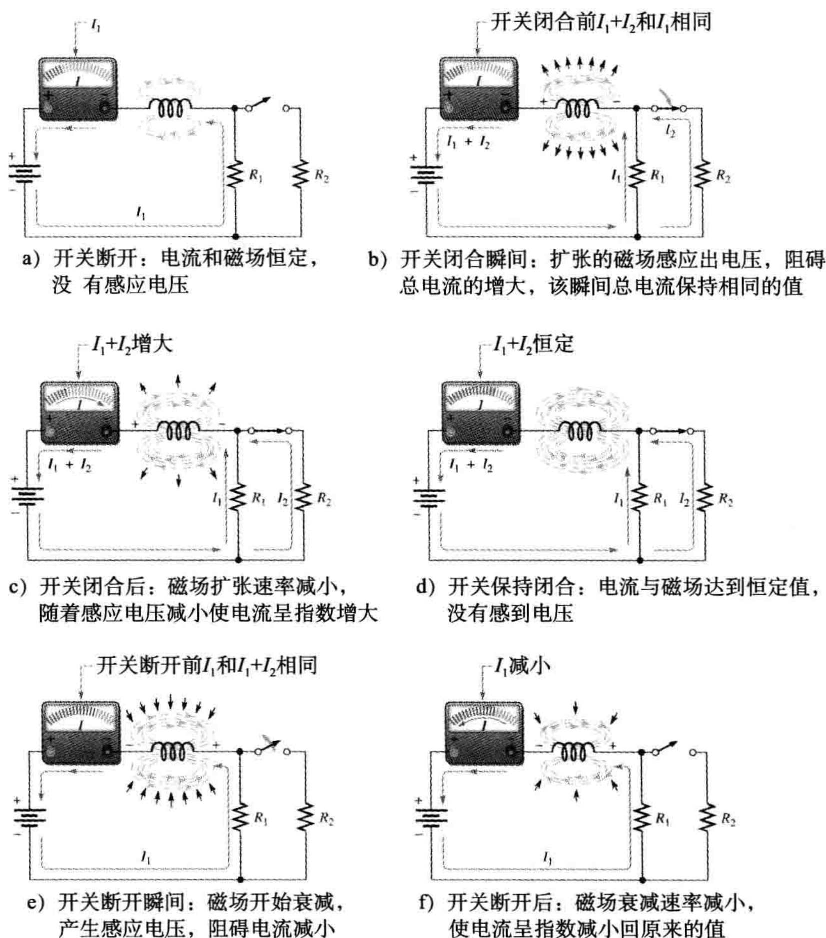
11.1.6　楞次定律

第 7 章介绍的楞次定律在法拉第定律中加入了感应电压的方向。

通过线圈的电流变化时，由它产生的磁场也发生变化，变化的磁场在线圈中产生感应电压，感应电压的方向总是阻碍电流的变化。

图 11-8 演示了楞次定律。图 11-8a 中采用受 R 限制的恒定电流，由于磁场不变化，所以没有感应电压。图 11-8b 中开关突然闭合，将 R_2 与 R 并联，从而减小电阻，电流自然试图增大，磁场开始扩张，但立即出现阻碍电流增大倾向的感应电压。

图 11-8c 中感应电压逐渐减小，允许电流增大。图 11-8d 中电流已经达到由并联电阻确定的恒定值，感应电压为零。图 11-8e 中开关突然断开，瞬间出现感应电压阻碍电流的任何减小。图 11-8f 中感应电压逐渐减小，允许电流减小回由 R_1 确定的值。注意，感应电压的极性总是阻碍电流的任何变化。对于电流增大的情况，感应电压的极性与电池极性相反；而对于电流减小的情况，感应电压的极性则和电池电压一致。



a）开关断开：电流和磁场恒定，没 有感应电压

b）开关闭合瞬间：扩张的磁场感应出电压，阻碍总电流的增大，该瞬间总电流保持相同的值

c）开关闭合后：磁场扩张速率减小，随着感应电压减小使电流呈指数增大

d）开关保持闭合：电流与磁场达到恒定值，没有感到电压

e）开关断开瞬间：磁场开始衰减，产生感应电压，阻碍电流减小

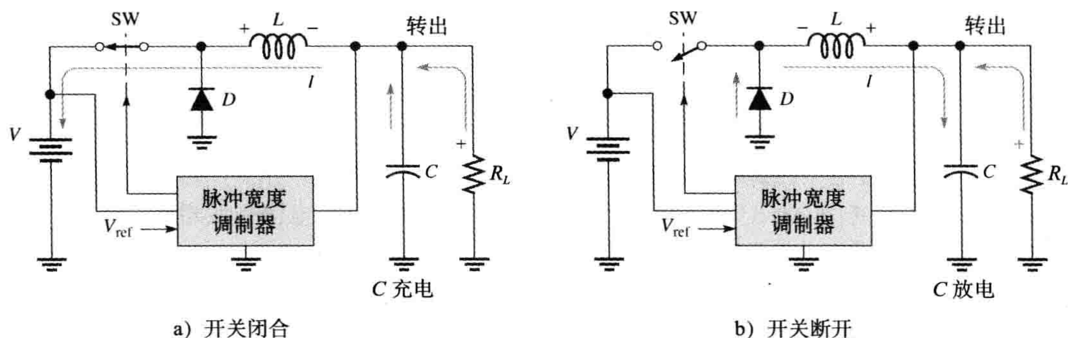
f）开关断开后：磁场衰减速率减小，使电流呈指数减小回原来的值

图 11-8　电感电路中楞次定律演示：当电流试图突然增大时，电磁场变化并感应出阻碍电流变化的电压

系统举例 11-1 开关电源

电源通常将交流转换为直流，几乎在所有电子设备中都要使用电源。开关晶体管和 IC 脉冲宽度调制器（PWM）快速发展后，开关电源（SMPS）在 20 世纪 70 年代开始流行。苹果Ⅱ计算机是 1977 年发布的第一台使用开关电源的计算机系统，使得系统运行更加高效，电源温度更低。目前，几乎所有计算机都使用开关电源。

简化的降压型 SMPS 示意图如图 11-9 所示。开关 SW 表示 MOSFET 开关晶体管，用于在断开和闭合之间迅速交替变换（大约 20 000 次/S）。V 代表未稳压的直流输入电压。脉冲宽度调制器是一个控制器，用于将输出与参考电压进行比较并设置脉冲宽度以保持输出恒定。



a）开关闭合　　b）开关断开

图 11-9 简化降压型开关电源

我们的关注焦点是电感 L，它是 SMPS 的关键元件。由楞次定律可知电感阻碍电流变化，在图 11-9a 中，晶体管导通表示开关闭合，流向负载的主电流路径用箭头表示。当磁场建立并趋于保持负载的电流恒定时，电感两端的感应电压阻碍直流输入。在图 11-9b 中，开关断开（晶体管截止），由电容器提供的电流通过二极管流通，注意当磁场衰减时电感具有和电源相同的极性，感应电压阻碍其中电流的变化，结果在负载中得到近似恒定的电流。

本节测试题

1. 列出影响线圈电感的参数。
2. 说明下列情况发生时 L 的变化：
   (a) N 增大
   (b) 磁心长度加大
   (c) 磁心的截面积减小
   (d) 铁磁磁心换成空气磁心
3. 说明为什么电感具有一定的线圈电阻。
4. 说明为什么电感具有一定的线圈电容。

11.2 电感的种类

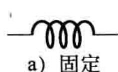
电感通常根据其所用磁心材料进行分类。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论各种类型的电感；
- 描述固定电感的基本类型；
- 区分固定电感和可变电感。

电感可以做成各种形状与大小，电感基本分成两类：固定电感和可变电感。标准电路符号如图 11-10 所示。

固定和可变电感均可按照磁心材料分类。常见的三类为：空气磁心、铁磁心和铁氧体磁心，每一种磁心拥有独特的符号，如图 11-11 所示。大数值的铁心电感很少使用。


a) 固定

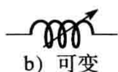
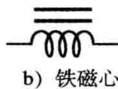

b) 可变

图 11-10 固定电感与可变电感的符号


a) 空气磁心


b) 铁磁心

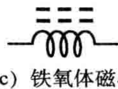

c) 铁氧体磁心

图 11-11 电感的符号

可调（可变）电感通常有一个螺钉型调节，将滑动型磁心移进移出，从而改变电感。电感的种类繁多，图 11-12 示出一些例子。小型固定电感通常封装在绝缘材料内，以保护线圈的细金属丝。封装的电感外观类似小电阻。低值电感用于高频应用，采用表面贴装类型，包括某些铁氧体磁心结构。

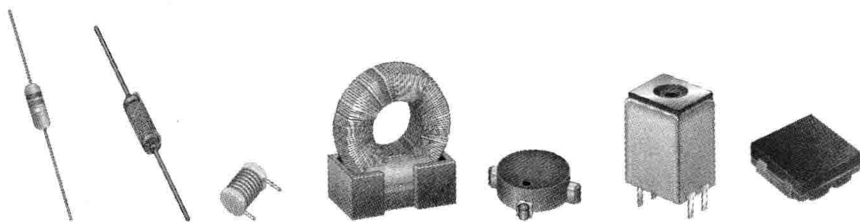


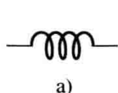
图 11-12 典型电感

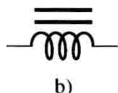
系统注释 屏蔽电感

在某些情况下电感可能向外辐射电磁能量，对附近的电路造成干扰。为了避免这种情况，工程师们有时会指定屏蔽电感。可以购买到小型表面贴封装的屏蔽电感，采用即位焊接。屏蔽的表面贴装电感可从 1μH～1mH。

本节测试题

1. 给出电感的两种一般类型名称。
2. 识别图 11-13 中的电感符号。


a)


b)

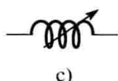

c)

图 11-13

11.3 电感的串联与并联

当电感串联时，总电感增大；当电感并联时，总电感减小。

学习完本节内容，应该能够

- 分析串联与并联电感；
- 确定串联总电感；
- 确定并联总电感。

11.3.1 串联总电感

电感如图 11-14 所示串联时，总电感 L_T 为各个串联电感之和。下面的式子给出了一般情况下 n 个电感串联 L_T 的表示公式：

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + L_n \tag{11-3}$$

注意，串联总电感的计算与串联总电阻的计算（见第 4 章）以及并联总电容计算（见第 9 章）类似。

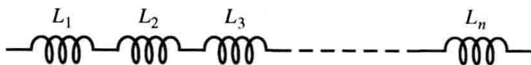


图 11-14 电感串联

【例 11-2】 试确定图 11-15 中每个串联的总电感。



图 11-15

解：对于图 11-15a

$$L_T = 1\text{nH} + 2\text{nH} + 1.5\text{nH} + 5\text{nH} = 9.5\text{nH}$$

对于图 11-15b

$$L_T = 5\text{mH} + 2\text{mH} + 10\text{mH} + 1\text{mH} = 18\text{mH}$$

注意：$1000\mu\text{H} = 1\text{mH}$。

相关问题：三个 $50\mu\text{H}$ 电感串联的总电感是多少?

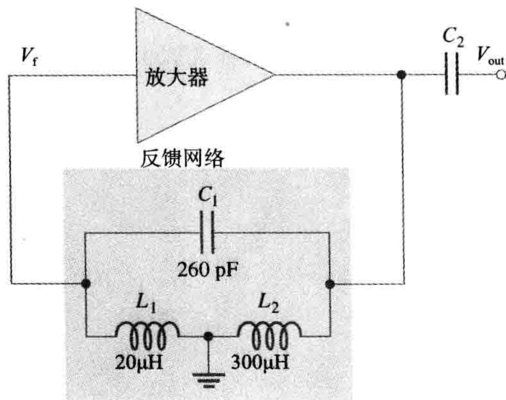


图 11-16 哈脱莱振荡器

系统举例 11-2 哈脱莱振荡器

回顾系统举例 9-1，振荡器是一种产生重复波形的电路，图 11-16 所示的电路为使用串联电感的哈脱莱（Hartley）振荡器。和考毕兹振荡器一样，该电路也使用正反馈，通过反馈网络将输出的一部分返回到输入端放大并加强输出。反馈取自 L_1 两端并以接地为参考，虽然这是一个交流电路，但电感和感应电压的方程形式与直流时相同。

电感 $L1$ 和 $L2$ 串联构成谐振电路（谐振电路将在第 13 章介绍）的一部分，将两个电感相加得到总电感。

$$L_T = L_1 + L_2 = 20\mu\text{H} + 300\mu\text{H} = 320\mu\text{H}$$

放大器信号以接地为参考，反馈信号 V_f 取自 L_1 两端，是输出的一部分，注意 V_f 返回到放大器的输入端。利用串联电感的分压原理可以求得输出电压中反馈的比例（V_f/V_{out}）。

$$\frac{V_f}{V_{out}} = \frac{L_1}{L_T} = \frac{20\mu\text{H}}{320\mu\text{H}} = 0.0625 = 6.2\%$$

与电容的情况不同，小电感在输出电压中分得的电压也小。

11.3.2 并联总电感

电感如图 11-17 并联时，总电感小于最小的并联电感。通用公式指出，总电感的倒数等于各个并联电感倒数之和。

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \cdots + \frac{1}{L_n}$$

对上式两边取倒数即可求得总电感。

$$L_T = \frac{1}{\dfrac{1}{L_1} + \dfrac{1}{L_2} + \dfrac{1}{L_3} + \cdots + \dfrac{1}{L_n}} \tag{11-4}$$

并联总电感的计算与并联总电阻（见第 5 章）和串联总电容（见第 9 章）的计算类似。对于电感的串并联组合，确定总电感的方法与串并联电阻电路所用的方法相同（见第 6 章）。

【例 11-3】 求图 11-18 中的 L_T。

解：
$$L_T = \frac{1}{\dfrac{1}{L_1} + \dfrac{1}{L_2} + \dfrac{1}{L_3}} = \frac{1}{\dfrac{1}{10\text{mH}} + \dfrac{1}{5\text{mH}} + \dfrac{1}{2\text{mH}}} = \frac{1}{0.8\,(\text{mH})^{-1}} = 1.25\text{mH}$$

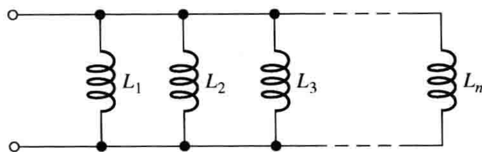


图 11-17 电感并联

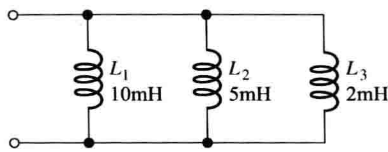


图 11-18

相关问题：求电感 50μH、80μH、100μH 和 150μH 并联时的 L_T。

本节测试题

1. 说明串联电感的组合原理。
2. 试问 100μH、500μH 和 2mH 串联的 L_T 是多少？
3. 五个 100mH 电感串联，试问总电感是多少？
4. 试对并联总电感和最小的电感值进行比较。
5. 并联总电感的计算与并联电阻的计算类似（T 或 F）。
6. 求下列各个并联组合的 L_T。
   (a) 100mH，50mH 和 10mH
   (b) 40μH 和 60μH

11.4 直流电路中的电感

当电感接到直流电压源时，能量被存储在电磁场中。流过电感的电流建立的方式是可预测的，这取决于电路的时间常数，电路时间常数由电路中的电感和电阻确定。

学习完本节内容，应该能够

- 分析电感性直流开关电路；
- 定义 RL 时间常数；
- 描述电感中电流的增大和减小；
- 将时间常数与电感的通电和断电联系起来；
- 描述感应电压；
- 写出电感电流的指数表达式。

电感中流过恒定直流电流时不存在感应电压，但由于线圈电阻的原因，电感两端存在一个电压降。电感本身对直流表现为短路。能量按公式 $W=1/2LI^2$ 存储在磁场中，仅在线圈电阻中能量转换为热（$P=I^2R_W$），这一状况如图 11-19 所示。

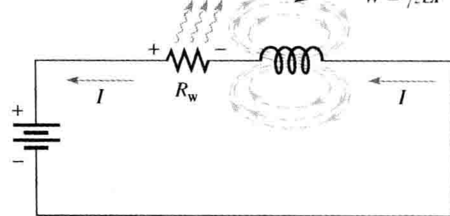


图 11-19 电感中的能量存储与转换为热

11.4.1 RL 时间常数

由于电感的基本功能是建立阻碍电流变化的电压，因此不允许电感中的电流瞬间改变。电流从一个值变化到另一个值需要一定的时间，电流变化的速率由 RL 时间常数确定。

RL 时间常数是一个等于电感与电阻之比的固定时间间隔。

公式为

$$\tau=\frac{L}{R} \tag{11-5}$$

式中，τ 的单位为秒，电感（L）的单位为亨利，电阻（R）的单位为欧姆。

【例 11-4】 串联 RL 电路的电阻为 1.0kΩ，电感为 1.0mH，试问时间常数是多少？

解：
$$\tau=\frac{L}{R}=\frac{1.0\text{mH}}{1.0\text{k}\Omega}=\frac{1.0\times10^{-3}\text{H}}{1.0\times10^{3}\Omega}=1.0\times10^{-6}\text{s}=1.0\mu\text{s}$$

相关问题：对 $R=2.2\text{k}\Omega$、$L=500\mu\text{H}$，求时间常数。

11.4.2 电感中的电流

电流增长 在串联 RL 电路中，施加电压后第一个时间常数间隔电流将增长到其满值的约 63%，电流的这种建立（类似于 RC 电路充电期间电容电压的建立）服从指数曲线。表 11-1 列出各时间常数间隔达到最终值的大致百分比，电流曲线如图 11-20 所示。

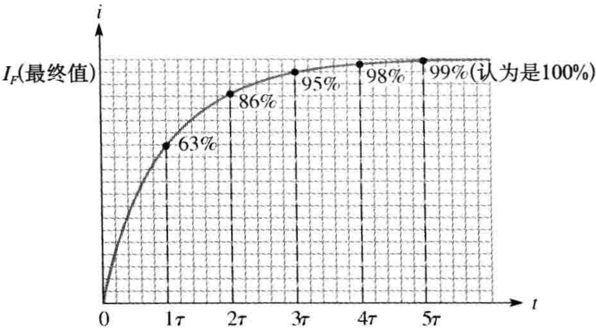


图 11-20 电感中电流的增长

表 11-1 电流建立期间每个时间常数间隔后达到最终电流的百分比

时间常数倍数	最终电流的大致百分比/%
1	63
2	86
3	95
4	98
5	99（认为是 100%）

5 个时间常数间隔电流的变化如图 11-21 所示。经过大约 5τ 时间，电流达到其最终值，不再变化，此时电感对于恒定电流可视为短路（除了线圈电阻），电流的最终值是

$$I_F=\frac{V_S}{R}=\frac{10\text{V}}{1.0\text{k}\Omega}=10\text{mA}$$

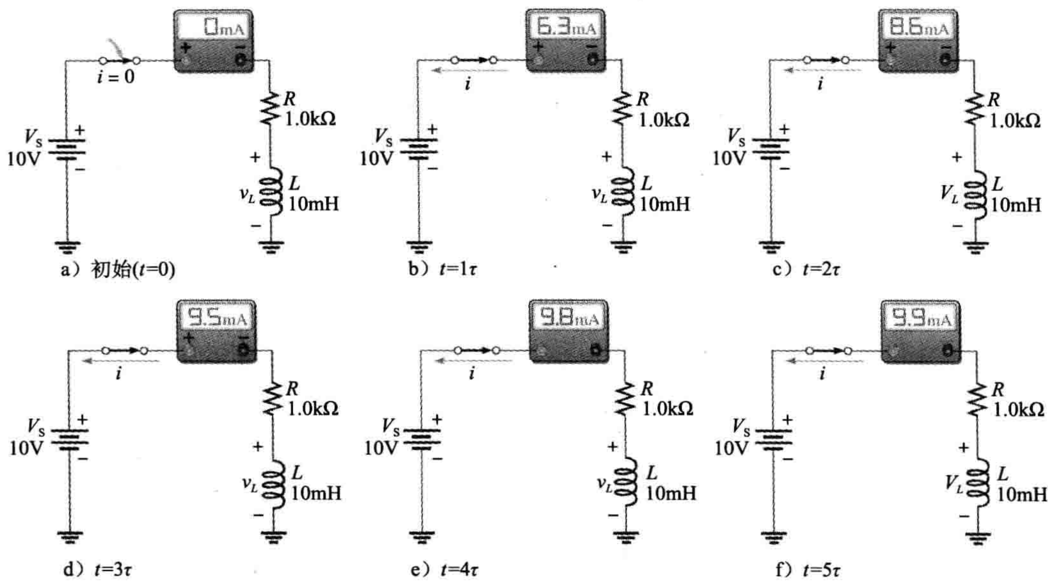


图 11-21 电感中电流指数增长演示。开关闭合后的每个时间常数间隔电流增长约 63%。线圈中的感应电压（v_L）试图阻碍电流增长

【例 11-5】 计算图 11-22 中的 RL 时间常数，然后从开关闭合瞬间开始确定每个时间常数间隔时刻的电流。

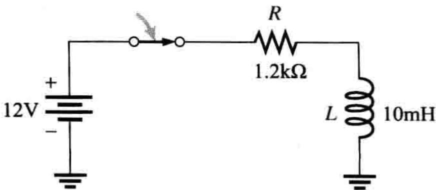


图 11-22

解： RL 时间常数为

$$\tau=\frac{L}{R}=\frac{10\text{mH}}{1.2\text{k}\Omega}=8.33\mu\text{s}$$

最终电流为

$$I_F=\frac{V_S}{R}=\frac{12V}{1.2k\Omega}=10mA$$

利用表11-1中的时间常数百分比值

1τ：$i=0.63\times10mA=6.3mA$；$t=8.33\mu s$

2τ：$i=0.86\times10mA=8.6mA$；$t=16.7\mu s$

3τ：$i=0.95\times10mA=9.5mA$；$t=25.0\mu s$

4τ：$i=0.98\times10mA=9.8mA$；$t=33.3\mu s$

5τ：$i=0.99\times10mA=9.9mA\approx10mA$；$t=41.7\mu s$

相关问题：如果$R=680\Omega$，$L=100\mu H$，重新计算。

电流衰减 电感电流指数衰减的近似百分比值如表11-2和图11-23所示。

表11-2 电流衰减期间每个时间常数间隔后初始电流的百分比

时间常数倍数	初始电流的大致百分比/%
1	37
2	14
3	5
4	2
5	1（认为是0）

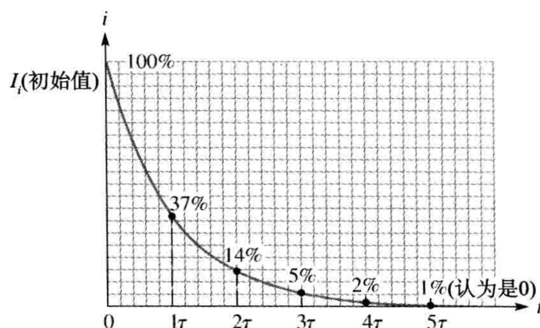


图11-23 电感中电流衰减

五个时间常数间隔电流的变化如图11-24所示。当电流达到其最终值约0A时，不再改变。开关断开之前，通过L的电流为10mA恒定值，由于理想情况L等效为短路，该电流值由R_1确定。开关断开时，电感的感应电压最初通过R_2提供10mA电流，每个时间常数的时间间隔电流降低63%。

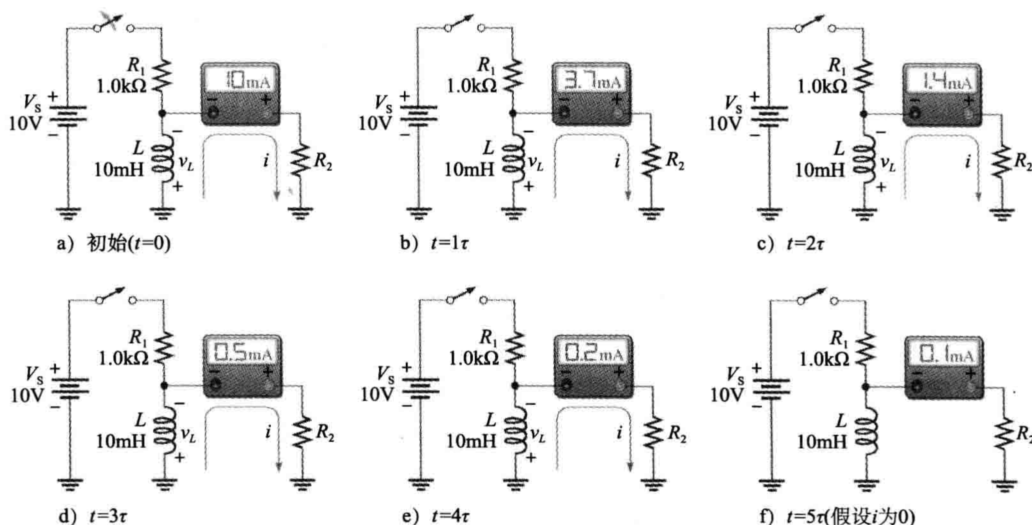


图 11-24

11.4.3 对方波的响应

演示RL电路电流增长和衰减的一个好方法是使用方波电压作为输入。方波是观察电路直

流响应的有用信号，它提供了类似开关断开和闭合的动作。脉冲响应将在第 15 章中进一步讨论。当方波从低电平向高电平变化时，电路中电流响应按指数增长至其最终值；当方波从高电平返回到零电平时，电路中电流响应按指数衰减至零值。图 11-25 显示了输入电压的波形和电流的波形。电流与电阻两端的电压具有相同的波形，因此，两通道差分测量可以显示波形。

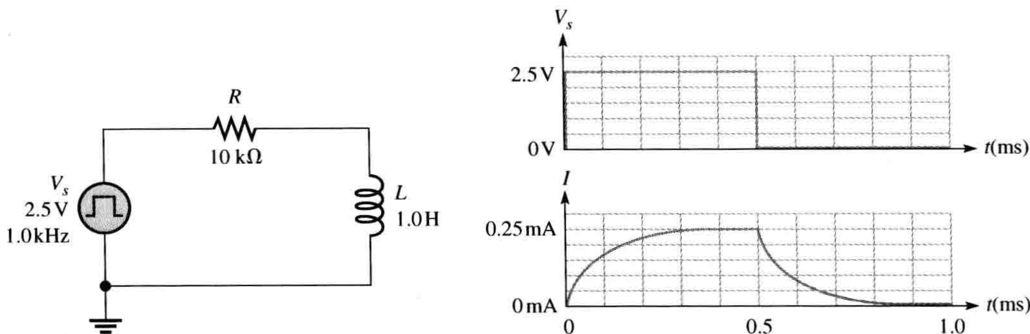


图 11-25

【例 11-6】 试问图 11-25 所示的电路在 0.1ms 和 0.6ms 时电流是多少？

解： 电路的 RL 时间常数为

$$\tau=\frac{L}{R}=\frac{1.0\text{H}}{10\text{k}\Omega}=0.1\text{ms}$$

如果方波发生器的周期足够长，在 5τ 时间内电流能达到最大值，电流将按指数规律增长，每个时间常数时间间隔达到最终电流的百分比由表 11-1 给出。最终电流为

$$I_F=\frac{V_S}{R}=\frac{2.5\text{V}}{10\text{k}\Omega}=0.25\text{mA}$$

0.1ms 时的电流为

$$i=0.63\times0.25\text{mA}=0.158\text{mA}$$

0.1ms 时，方波输入电压降到 0V 电平达 0.1ms 或 1τ，而电流从最大值向最终值 0mA 衰减了 63%，因此

$$i=0.25\text{mA}-0.63\times0.25\text{mA}=0.092\text{mA}$$

相关问题：试问在 0.2ms 和 0.8ms 时电流是多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E11-06，注意为了在电阻的一端接地以便测量电阻两端电压，电感与电阻交换了位置，电路中电流的形状与电阻电压相同，应用欧姆定律到电阻电压可以求得任意时刻电路中的电流。确认在 0.1ms 时刻的电流接近计算值。

11.4.4 串联 *RL* 电路的电压

我们知道，电感电流的变化会产生感应电压。让我们来看看在方波输入一个完整周期内图 11-26所示串联电路中电感两端的感应电压会发生什么变化。记住，信号发生器输出高电平就像接通直流电压源，而降回零电平时则在电源两端提供低电阻（理想为零）路径。

在电路中设置电流表显示任意时刻的电流，V_L 波形为电感两端的电压。在图 11-26a 中，方波刚从零电平跳变到最大值 2.5V，根据楞次定律，电感两端感应的电压阻碍电感周围建立的磁场变化，电路中只有阻碍的电压而没有电流。

随着磁场的建立，电感两端的感应电压降低，电路中开始有电流流过。经过 1τ 后，电感

两端的感应电压下降 63％，使电流增长 63％至 0.158mA。一个时间常数结束时（0.1ms）的情况如图 11-26b 所示。

电感电压继续按指数衰减到零，这时电流仅由电阻决定。在 $t=0.5\text{ms}$ 时方波从高电平变回零电平，如图 11-26c 所示。电感两端再次感应出电压阻碍这一变化，这时由于磁场衰减，电感电压的极性反转。虽然电源电压为 0，但衰减的磁场保持电流以相同方向流通直至减小到零，如图 11-26d 所示。

在图 11-26d 中，电阻两端的电压 V_R 可根据基尔霍夫电压定律从电源电压 V_S 中减去电感两端的电压 V_L 得到，V_R 的波形形状与图 11-25 中电流的波形相同。

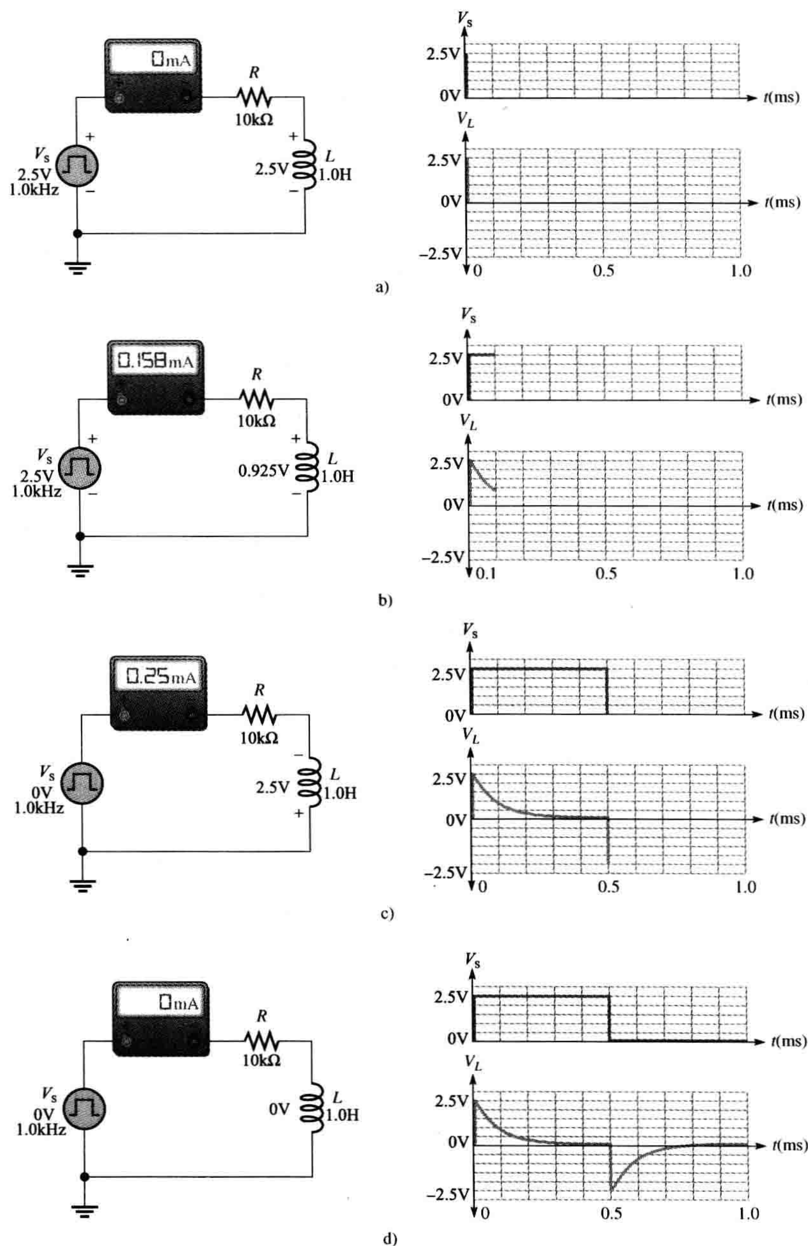


图　11-26

【例 11-7】 (a) 图 11-27 中电路输入为方波，试问能够完整观察电感两端波形的最高频率是多少?

(b) 假设信号发生器按 (a) 设置频率，试描述电阻两端的电压波形。

解: (a) $\tau = \dfrac{L}{R} = \dfrac{15\text{mH}}{33\text{k}\Omega} = 0.454\mu\text{s}$

方波的周期必须比时间常数 τ 的十倍大，才能观察到完整波形。

$$T = 10\tau = 4.54\mu\text{s}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4.54\mu\text{s}} = 220\text{kHz}$$

(b) 电阻两端电压的波形与电流的波形相同，一般波形如图 11-26 所示，最大值为 10V (假设没有线圈电阻，与 V_S 相同)。

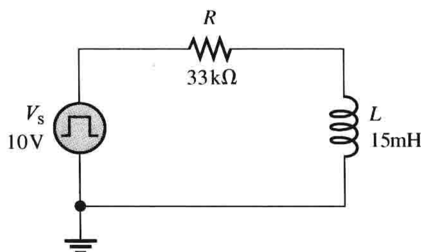


图 11-27

相关问题：对 f =220kHz，试问电阻两端的最大电压是多少?

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E11-07，将频率设置为计算值，观察电感两端的电压波形。

11.4.5 指数公式

RL 电路中指数电流与电压的公式与第 9 章的 *RC* 电路相似，图 9-36 中的通用指数曲线既可以用于电容也可以用于电感。*RL* 电路的一般公式表示如下：

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-Rt/L} \tag{11-6}$$

$$i = I_F + (I_i - I_F)e^{-Rt/L} \tag{11-7}$$

其中，V_F和 I_F为最终值，V_i和 I_i为初始值，v 和 i 为时刻 t 时电感电压和电流的瞬时值。

电流增长 电流从零开始 (I_i=0) 指数增长这种特殊情况的公式为

$$i = I_F(1 - e^{-Rt/L}) \tag{11-8}$$

利用式 (11-8) 可以计算任意时刻增长的电感电流值，可在式 (11-8) 中将 i 换成 v、I_F换成 V_F计算电压。指数 $-Rt/L$ 也可以写成 $-t/(L/R) = -t/\tau$ 。

【例 11-8】 在图 11-28 中，求开关闭合 30μs 时电感的电流。

解: *RL* 时间常数为

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{100\text{mH}}{2.2\text{k}\Omega} = 45.5\mu\text{s}$$

最终电流为

$$I_F = \frac{V_S}{R} = \frac{12\text{V}}{2.2\text{k}\Omega} = 5.45\text{mA}$$

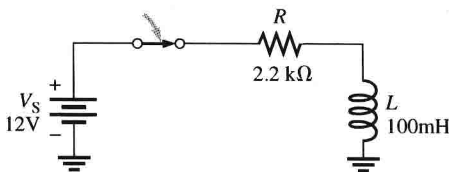


图 11-28

初始电流为零，注意 30μs 小于一个时间常数，所以这时电流将增长至不足最终值的 63%。

$$i_L = I_F(1 - e^{-Rt/L}) = 5.45\text{mA} \times (1 - e^{-0.66}) = 2.63\text{mA}$$

相关问题：在图 11-2 中，求开关闭合 55μs 时电感的电流。

电流衰减 电流按指数衰减到零的特殊情况下，电流的公式是

$$i = I_i e^{-Rt/L} \tag{11-9}$$

这个公式可以计算任意时刻衰减的电感电流值。

【例 11-9】 在图 11-29 中，试问图示方波输入一个完整周期内每微秒间隔的电流是什么？计算每个时刻的电流后画出电流的波形。

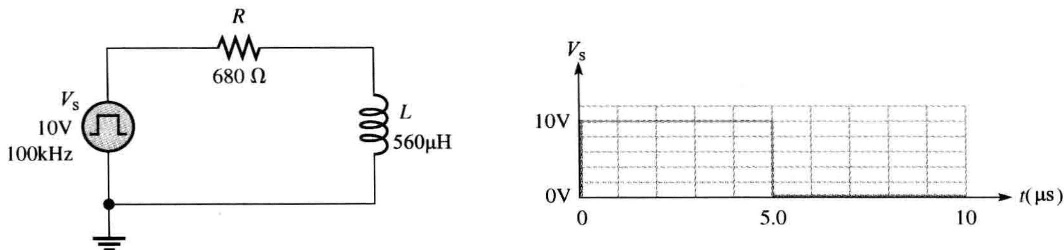


图 11-29

解：RL 时间常数为

$$\tau=\frac{L}{R}=\frac{560\mu H}{680\Omega}=0.824\mu s$$

当脉冲在 $t=0$ 时从 0V 上升到 10V 时，电流指数增长，最终值为

$$I_F=\frac{V_S}{R}=\frac{10V}{680\Omega}=14.7mA$$

对于增长的电流

$i=I_F(1-e^{-Rt/L})=I_F(1-e^{-t/\tau})$。

$t=1\mu s$ 时：$i=14.7mA\times(1-e^{-1\mu s/0.824\mu s})=10.3mA$

$t=2\mu s$ 时：$i=14.7mA\times(1-e^{-2\mu s/0.824\mu s})=13.4mA$

$t=3\mu s$ 时：$i=14.7mA\times(1-e^{-3\mu s/0.824\mu s})=14.3mA$

$t=4\mu s$ 时：$i=14.7mA\times(1-e^{-4\mu s/0.824\mu s})=14.6mA$

$t=5\mu s$ 时：$i=14.7mA\times(1-e^{-5\mu s/0.824\mu s})=14.7mA$

当脉冲在 $t=5\mu s$ 时从 10V 下降到 0V，电流指数衰减。

对于衰减的电流

$$i=I_i e^{-Rt/L}=I_i e^{-t/\tau}$$

初始电流为在 5μs 时的值：14.7mA。

$t=6\mu s$ 时：$i=14.7mA\times e^{-1\mu s/0.824\mu s}=4.37mA$

$t=7\mu s$ 时：$i=14.7mA\times e^{-2\mu s/0.824\mu s}=1.30mA$

$t=8\mu s$ 时：$i=14.7mA\times e^{-3\mu s/0.824\mu s}=0.38mA$

$t=9\mu s$ 时：$i=14.7mA\times e^{-4\mu s/0.824\mu s}=0.11mA$

$t=10\mu s$ 时：$i=14.7mA\times e^{-5\mu s/0.824\mu s}=0.03mA$

图 11-30 是结果图。

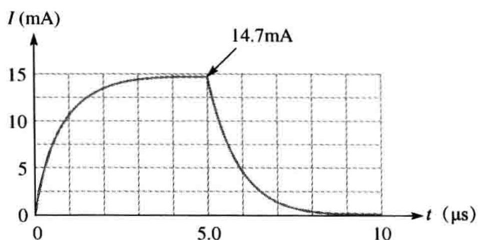


图 11-30

相关问题：试问在 0.5μs 时电流是多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E11-09，在电感与地之间放置一个非常低值的串联电阻，观察该电阻两端的电压波形，测量电流。

本节测试题

1. 15mH 电感的线圈电阻为 10Ω，流过 10mA 的恒定电流，试问电感两端的电压降是多少？
2. 20V 直流电压源通过开关与串联 RL 电路相接，试问，开关闭合瞬间 i 和 v_L 的值是多少？
3. 问题 2 同样的电路中，开关闭合 5τ 时间间隔后 v_L 是多少？
4. 串联 RL 电路中 $R=1.0k\Omega$、$L=500\mu H$，时间常数是多少？求开关接通 10V 电压源 0.25μs 时的电流。

11.5 交流电路中的电感

电感通过交流时具有一定的阻力，大小由交流频率决定。

学习完本节内容，应该能够

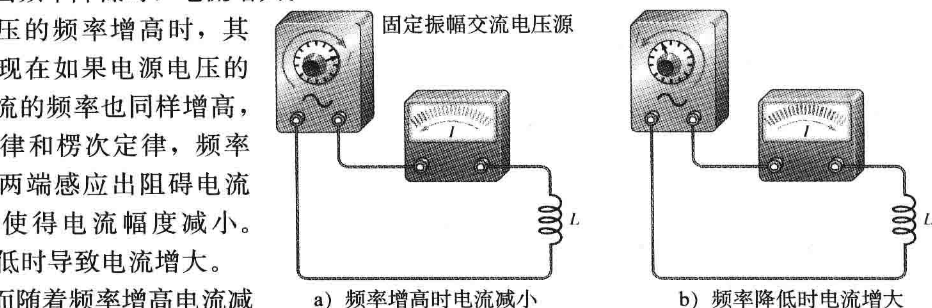
- 分析交流电感电路；
- 定义电感电抗；
- 确定给定电路的电感电抗；
- 讨论电感的瞬时功率、有功功率和无功功率。

11.5.1 电感电抗 X_L

在图 11-31 中电感接在正弦电压源上，当电压源保持恒定的振幅而频率增高时，电流幅度减小；相反，当频率降低时，电流增大。

当电源电压的频率增高时，其变化率增大。现在如果电源电压的频率增高，电流的频率也同样增高，根据法拉第定律和楞次定律，频率增高将在电感两端感应出阻碍电流的更大电压，使得电流幅度减小。同样，频率降低时导致电流增大。

电压固定而随着频率增高电流减小表示对电流的阻碍增大，因此电感提供了与频率成正比的对电流的阻碍。

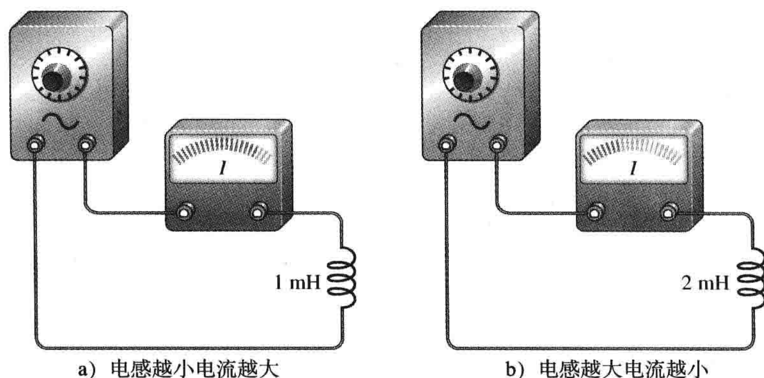


a）频率增高时电流减小　　b）频率降低时电流增大

图 11-31　电感电路的电流与电源电压的频率成反比

电感电抗是电感对正弦电流的阻碍。电感电抗的符号为 X_L，单位是欧姆（Ω）。

我们看到，频率影响电感对电流的阻碍（电感电抗），现在我们来看电感 L 如何影响电抗。图 11-32a 显示一个固定幅度和固定频率的正弦电压加在 1mH 电感两端，存在一定量的交变电流。当电感值增大到 2mH 时，电流减小，如图 11-32b 所示。这样当电感增大时其对电流的阻碍（电感电抗）增大。因此，电感电抗不仅与频率成正比，而且与电感成正比。这一关系可以表述如下：X_L与 fL 成正比。



a）电感越小电流越大　　b）电感越大电流越小

图 11-32　对于固定幅度和固定频率电源，电流随电感成反比变化

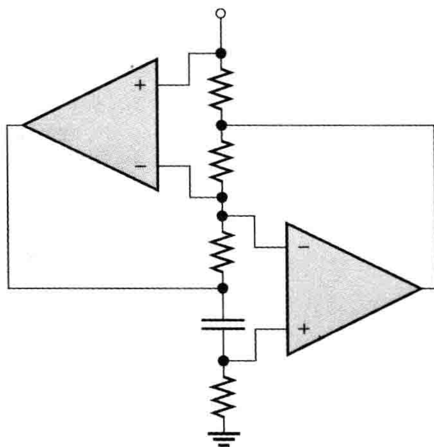
可以证明，比例常数为 2π，所以电感电抗的公式为

$$X_L = 2\pi fL \tag{11-10}$$

当 f 用赫兹表示、L 用亨利表示时，得到 X_L为欧姆，2π 项源自正弦波旋转运动的关系。

系统注释　回转器

电感器一般是非理想的元件，由于其物理尺寸，大电感不适合集成电路。模拟电感电路在有源滤波器和网络综合中非常有用，采用电阻、电容和两个运算放大器构成一个等效电感。回转器可以包含在 IC 中。



【例 11-10】　加在图 11-33 中电路的正弦电压的频率为 10kHz，求电感电抗。

解： 将 10kHz 转换为 10×10^3 Hz，5mH 转换为 5×10^{-3}H，则电感电抗为

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi\times(10\times10^3\text{Hz})\times(5\times10^{-3}\text{H}) = 314\Omega$$

相关问题：如果频率增高到 35kHz，求图 11-33 中的 X_L。

11.5.2 串联电感的电抗

式（11-3）给出了串联电感的总电感是各个串联电感之和，由于电抗与电感成正比，所以串联电感的总电抗为各个串联电感的电抗之和。

$$X_{L(tot)} = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + \cdots + X_{Ln} \qquad (11\text{-}11)$$

V_s　L 5mH

图　11-33

注意，式（11-11）与式（11-3）形式相同，与串联电阻求总电阻和串联电容求总电抗的形式也相同。当同种元件的电阻或电抗（电阻、电感或电容）串联组合时，只要简单地将各个串联阻碍相加即可得到总的阻碍。

11.5.3 并联电感的电抗

在并联电感的交流电路中，式（11-4）给出了求总电感的方法，总电感等于各个并联电感倒数之和的倒数。同样，总的电感电抗等于各个电感电抗的倒数之和的倒数。

$$X_{L(tot)} = \frac{1}{\dfrac{1}{X_{L1}} + \dfrac{1}{X_{L2}} + \dfrac{1}{X_{L3}} + \cdots + \dfrac{1}{X_{Ln}}} \qquad (11\text{-}12)$$

注意式（11-12）与式（11-4）具有相同的形式，与求解并联总电阻和并联总电容电抗的公式的形式也相同。当同种元件的电阻或电抗（电阻、电感或电容）并联组合时，只要简单地取阻碍倒数之和的倒数即可得到总的阻碍。

对于两个电感并联的特殊情况，式（11-12）可简化成积除以和的形式。

$$X_{L(tot)} = \frac{X_{L1}X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}}$$

【例 11-11】　试问图 11-34 中各个电路的总电感电抗是多少？

解： 两个电路中各个电感的电抗相同

$$X_{L1} = 2\pi fL_1 = 2\pi\times200\text{kHz}\times2.7\text{mH} = 3.39\text{k}\Omega$$

$$X_{L2} = 2\pi fL_2 = 2\pi\times200\text{kHz}\times4.7\text{mH} = 5.91\text{k}\Omega$$

对于图 11-34a 中的串联电感，由式（11-11）得总电抗为 X_{L1} 与 X_{L2} 之和

$$X_{L(tot)} = X_{L1} + X_{L2} = 3.39\text{k}\Omega + 5.91\text{k}\Omega = 9.30\text{k}\Omega$$

对于图 11-34b 中的并联电感，用 X_{L1} 与 X_{L2} 的积除以和的形式求总电抗

$$X_{L(tot)} = \frac{X_{L1}X_{L2}}{X_{L1} + X_{L2}} = \frac{3.39\text{k}\Omega\times5.91\text{k}\Omega}{3.39\text{k}\Omega + 5.91\text{k}\Omega} = 2.15\text{k}\Omega$$

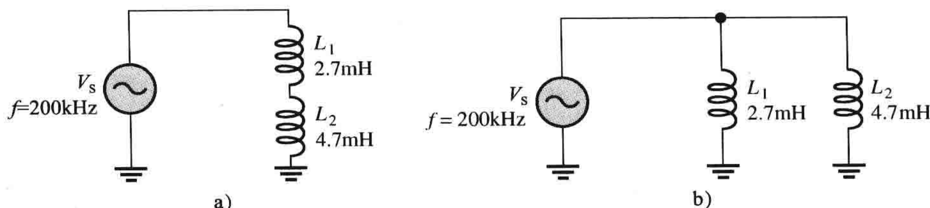


图 11-34

也可以先求出串联或并联总电感，然后再由式（11-10）求总电抗。

对于串联电感

$$L_T = L_1 + L_2 = 2.7\text{mH} + 4.7\text{mH} = 7.4\text{mH}$$

$$X_{L(\text{tot})} = 2\pi f L_T = 2\pi \times 200\text{kHz} \times 7.4\text{mH} = 9.30\text{k}\Omega$$

对于并联电感

$$L_T = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} = \frac{2.7\text{mH} \times 4.7\text{mH}}{2.7\text{mH} + 4.7\text{mH}} = 1.71\text{mH}$$

$$X_{L(\text{tot})} = 2\pi f L_T = 2\pi \times 200\text{kHz} \times 1.71\text{mH} = 2.15\text{k}\Omega$$

相关问题：如果 L_1 =1mH，L_2不变，试问图 11-34 中各电路的电感电抗是多少？

欧姆定律 电感的电抗类似于电阻器的电阻。事实上，X_L和 X_C与 R 一样都用欧姆表示，由于电感电抗表现为对电流的阻碍形式，因此，欧姆定律可以既可应用于电阻电路、电容电路，也可以应用于电感电路，表述如下：

$$I = \frac{V}{X_L} \tag{11-13}$$

在电路中应用欧姆定律时，电压和电流必须表示为同一种形式，即或者都是有效值，或者都是峰值等。

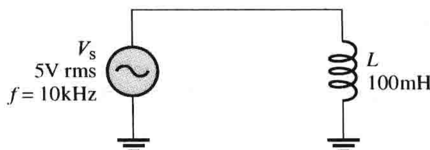


图 11-35

【例 11-12】 确定图 11-35 中的电流有效值。

解： 将 10kHz 转换成 10×10^3 Hz、100mH 转换成 100×10^3 H，然后求 X_L

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi \times (10 \times 10^3\,\text{Hz}) \times (100 \times 10^{-3}\,\text{H}) = 6283\Omega$$

应用欧姆定律

$$I_{\text{rms}} = \frac{V_{\text{rms}}}{X_L} = \frac{5\text{V}}{6283\Omega} = 796\mu\text{A}$$

相关问题：对于 V_{rms} =12V、f =4.9kHz、L=680μH 求图 11-35 中的电流有效值。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E11-12，测量电流有效值并与计算值比较。将电路参数修改为相关问题所给定的值，然后测量电流有效值。

11.5.4 电流滞后电感电压 90°

我们知道，正弦电压在过零点的变化率最大，而在峰值时的变化率为零。根据法拉第定律可知，线圈两端感应出的电压大小与电流变化率成正比，因此，线圈电压在电流的过零点时最大，此处电流的变化率最大；同样，线圈电压在电流的峰值时为零，此处电流的变化率为零。这一相位关系如图 11-36 所示。可以看出，电流的峰值在电压峰值出现后 1/4 周期处出现，因此说电流滞后电压 90°。回顾电容的情况，电容电流超前电压 90°。

11.5.5 电感的功率

如前所述，当有电流流过时电感将能量存储在磁场中，理想电感（假设没有线圈电阻）不消耗能量而仅存储能量。交流电压施加到电感电感上时，周期的部分时间电感存储能量，而周期的另一部分时间存储的能量又返还到电源，理想电感中没有净能量损失转化为热。图 11-37显示了电感电压和电流一个周期的功率曲线。将电感功率曲线与图 9-50 中的电容功率曲线作比较，主要差别是两个图的电压和电流的位置交换了。

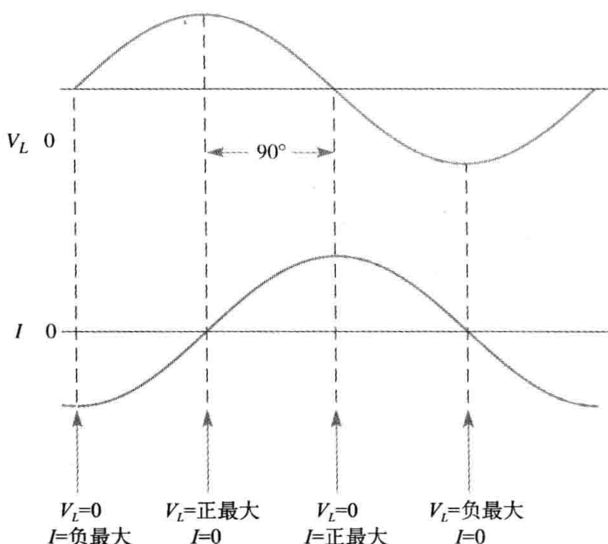


图 11-36 电流总是滞后于电感电压 90°

瞬时功率（p） 瞬时电压 v 和瞬时电流 i 相乘得到瞬时功率 p。在 v 和 i 为零的点，p 为零；当 v 和 i 都是正值时，p 也为正；当 v 和 i 一个为正值另一个为负值时，p 为负值；当 v 和 i 都是负值时，p 为正值。从图 11-37 中可见，功率也服从正弦形曲线，功率为正值表示电感存储能量，功率为负值表示能量从电感返还给电源。注意功率波动的频率是电压或电流频率的两倍，这也是能量交替存储与返还电源的频率。

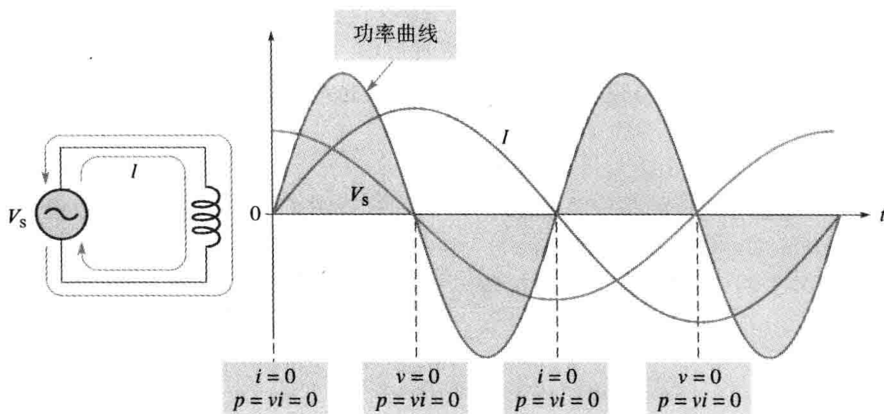


图 11-37 电感的功率曲线

有功功率（P_{ture}） 理想情况下，功率正半周存储的能量在负半周全部返还给电源，电感中没有净能量损失转化为热，所以功率为零。实际情况下，由于实际电感中线圈电阻的存在，总有部分功率损耗，存在少量的有功功率，有功功率通常可以忽略。

$$P_{true} = I_{rms}^2 R_W \qquad (11\text{-}14)$$

无功功率（P_r） 电感存储或返还能量的速率称为电感的*无功功率* P_r，单位为乏（Volt-Ampere Reactive，var）。由于任一瞬间电感实际上都在从电源获取能量或返还能量，因此无功功率是一个非零的量。无功功率并不表示能量损失转化为热。无功功率的公式如下：

$$P_r = V_{rms} I_{rms} \qquad (11\text{-}15)$$

$$P_r = \frac{V_{rms}^2}{X_L} \tag{11-16}$$

$$P_r = I_{rms}^2 X_L \tag{11-17}$$

【例 11-13】 频率为10kHz，电压有效值为10V的信号加到10mH、线圈电阻为40Ω的线圈两端，求无功功率和有功功率。

解： 首先计算电感电抗和电流值

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 10\text{kHz} \times 10\text{mH} = 628\Omega$$

$$I = \frac{V_S}{X_L} = \frac{10\text{V}}{628\Omega} = 15.9\text{mA}$$

然后利用式（11-17）

$$P_r = I^2 X_L = (15.9\text{mA})^2 \times 628\Omega = 159\text{mvar}$$

有功功率为

$$P_{true} = I^2 R_W = (15.9\text{mA})^2 \times 40\Omega = 10.1\text{mW}$$

相关问题：如果频率增高，试问无功功率将如何变化？

11.5.6 品质因数

品质因数（Q）是电感的无功功率与绕阻电阻的有功功率之比，即 L 的功率与 R_W 的功率之比。品质因数在谐振电路（将在第13章学习）中非常重要。Q 的公式推导如下：

$$Q = \frac{\text{无功功率}}{\text{有功功率}} = \frac{P_r}{P_{true}} = \frac{I^2 X_L}{I^2 R_W}$$

分子分母约去 I^2 项，得

$$Q = \frac{X_L}{R_W} \tag{11-18}$$

注意，Q 是两个相同量纲的比，所以本身没有量纲。因为线圈两端没有接负载，这一品质因数又称空载 Q 值。由于 X_L 与频率有关，因此 Q 同样也与频率有关。

本节测试题

1. 试说明电感中电流和电压的相位关系。
2. 计算 f =500Hz、L=1.0mH 时的 X_L。
3. 试问频率为多少时 50μH 电感的电抗等于 800Ω？
4. 计算图 11-38 中的电流有效值。
5. 50mH 的理想电感接在有效值为 12V 的电压源上，有功功率是多少？1kHz 频率时的无功功率是多少？

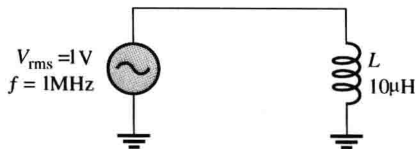


图 11-38

11.6 电感的应用

电感不如电容那样通用，由于尺寸、成本因素及非理想特性（内部电阻等），往往限制了电感的应用。电感最常见的应用之一是降噪。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论电感的应用；
- 讨论噪声进入电路的两种方式；
- 说明抑制电磁干扰（EMI）；
- 说明铁氧体磁珠的使用方法；
- 讨论调谐电路的基础。

11.6.1 噪声抑制

电感最重要的应用之一是抑制不必要的电噪声。应用中电感一般绕在闭合的磁心上，以避免电感本身成为辐射噪声源。噪声有两类：传导性噪声和辐射性噪声。

传导性噪声 许多系统中都存在连接系统不同部件的公共导电路径，它可以将高频噪声从系统的一个部分传导到另一部分。考虑如图 11-39a 所示的用公共导线连接两个电路的情况。通过公共接地形成高频噪声路径，称为接地回路。在仪器仪表系统中接地回路是一个特别重要的问题，这里传感器可能远离记录系统，接地中的噪声电流可能对信号产生影响。

如果感兴趣的信号变化缓慢，可以在信号线上安装一个特殊的电感，该电感称为纵向扼流圈，如图 11-39b 所示。纵向扼流圈是变压器（第 14 章介绍）的一种形式，在每条信号线上表现为一个电感，这样接地回路变成了高阻抗路径，从而减小了噪声，而对于低频信号，则通过低阻抗的扼流圈耦合。

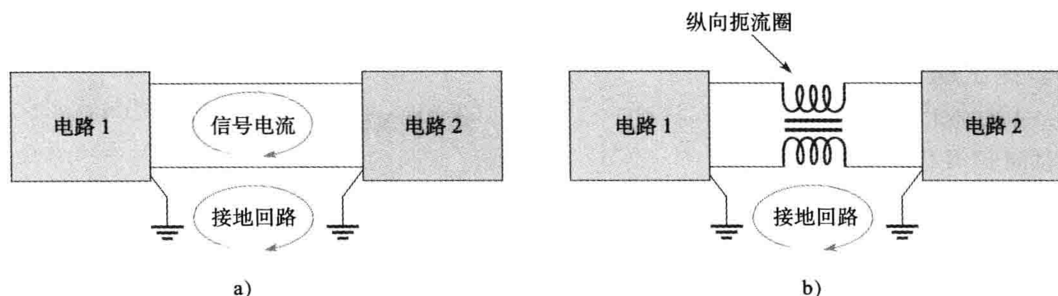


图 11-39

由于本身所具有的高频分量，开关电路也会产生高频噪声（10MHz 以上）。（回顾 8.5 节快速脉冲包含很多高频谐波）某些类型的电源使用高速开关电路，这些高速开关电路既是传导性噪声源也是辐射性噪声源。由于电感的阻抗随着频率增高而增大，所以电感是电源中阻断噪声而只流通直流的良好选择。在电源线上常安装电感抑制传导性噪声，以免一个电路对另一电路产生不利影响。也可用一个或多个电容与电感结合，以改善滤波效果。

辐射性噪声 噪声也可能通过电磁场方式进入电路，噪声源可以是相邻的电路或附近电源。有几种方法可以减小辐射性噪声的影响。通常，第一步是确定噪声的原因，然后通过屏蔽或滤波进行隔离。电感广泛用于抑制射频噪声的滤波器，用于噪声抑制的电感必须仔细选择，以免它自身成为辐射噪声源。对于高频（>20MHz）噪声，广泛使用绕在高导磁率环形磁心的电感，因为磁通被限制在磁心内。

小贴士 面包板电路中包含小尺寸电感时，最好使用封装的电感，以提高结构强度。连接到大尺寸引线的电感的线圈导线通常极其精细。

如果在面包板上频繁插入和拔出未封装的电感，很容易破坏触点。

11.6.2 射频扼流圈

用于阻隔非常高频率噪声的电感称为射频（RF）扼流圈，射频扼流圈可用于抑制传导性噪声和辐射性噪声，是一类特殊的电感，通过提供对高频的高阻抗路径，阻止高频噪声或信号进入或离开系统。一般情况下，扼流圈和需要作射频抑制的线路串联，干扰的频率不同，需要

的扼流圈类型不同。常见的电磁干扰（EMI）滤波器是将信号线在环形磁心上绕几圈，采用环形磁心可将磁场约束在其中，从而不使扼流圈本身成为噪声源。

射频扼流圈另一个常见的类型是铁氧体磁珠。所有导线都具有电感，铁氧体磁珠是一个串到导线上的小铁磁材料，用以增加导线电感。磁珠所呈现的阻抗与材料、频率以及磁珠的大小有关，是一种对高频的高效而廉价的“扼流圈”。铁氧体磁珠在高频通信系统很常见，有时采用多个串联在一起，以增加有效电感。

11.6.3 调谐电路

在通信系统中，利用电感与电容构成频率选择电路，这些调谐电路允许窄带的被选择频率通过，而抑制所有其他的频率。电视机和收音机的调谐器就是基于这个原理，可以在众多频道或电台中选择一个频道或电台。

频率选择性基于这样的事实：电容和电感的电抗都随频率变化，两者串联或并联连接时相互作用。由于电容和电感产生相反的相移，利用它们的组合可以在选定频率获得期望的响应。第13章将详细介绍调谐（谐振）*RLC* 电路。

本节测试题

1. 给出两种不希望的噪声名称。
2. 试问 EMI 代表什么？
3. 试问铁氧体磁珠如何使用？

本章小结

- 电感是线圈中因电流变化建立感应电压的能力度量。
- 电感阻碍其自身电流的变化。
- 法拉第定律指出磁场与线圈之间的相对运动在线圈两端感应出电压。
- 楞次定律指出感应电压的极性，产生的感应电流的方向阻碍引起感应电压的磁场变化。
- 电感将能量存储在磁场中。
- 当每秒一安培变化的电流在电感两端感应一伏特电压时，电感为一亨利。
- 电感与匝数的平方、磁导率和磁心截面积成正比，与磁心长度成反比。
- 磁心材料的磁导率是该材料中建立磁场的能力表示。
- 电感串联相加。
- 并联总电感小于并联的最小电感。
- 串联 *RL* 电路的时间常数为电感除以电阻。
- 在 *RL* 电路中，每个时间常数间隔电感电压或电流增长或衰减大约 63%。
- 电感电压或电流按指数曲线增长与衰减。
- 电感电压超前电流 90°。
- 电感电抗（X_L）与频率和电感成正比。
- 电感的有功功率为零，即理想电感中没有能量转换为热，只在线圈电阻中能量转换为热。

关键术语

线圈（Coil） 电感的常用术语之一。

亨利（Henry，H） 电感的单位。

感应电压（Induced voltage） 变化的磁场产生的电压。

电感（Inductance） 电感器的一种特性，电流的变化引起电感器中产生电压阻碍电流的变化。

电感电抗（Inductive reactance） 电感对正弦电流的抵抗力，单位为欧姆。

电感器（Inductor） 一种无源元件，由线圈构成，具有电感特性。

品质因数（Quality factor，*Q*） 无功功率与有功功率的比值。

***RL* 时间常数（*RL* time constant）** 固定的时间间隔，由 *L* 和 *R* 确定，决定了电路的时间响应。

线圈（Winding） 电感中的导线圈或环路。

线圈电阻（Winding resistance） 构成线圈的导线长度的电阻。

关键公式

(11-1) $W=\frac{1}{2}LI^2$ 电感存储的能量

(11-2) $L=\frac{N^2\mu A}{l}$ 由物理参数表示的电感

(11-3) $L_T=L_1+L_2+L_3+\cdots+L_n$ 串联电感

(11-4) $L_T=\frac{1}{\frac{1}{L_1}+\frac{1}{L_2}+\frac{1}{L_3}+\cdots+\frac{1}{L_n}}$ 并联电感

(11-5) $\tau=\frac{L}{R}$ RL 时间常数

(11-6) $v=V_F+(V_i-V_F)e^{-Rt/L}$ 指数电压（通用）

(11-7) $i=I_F+(I_i-I_F)e^{-Rt/L}$ 指数电流（通用）

(11-8) $i=I_F(1-e^{-Rt/L})$ 从零开始的指数增长电流

(11-9) $i=I_i e^{-Rt/L}$ 终值为零的指数衰减电流

(11-10) $X_L=2\pi fL$ 电感电抗

(11-11) $X_{L(tot)}=X_{L1}+X_{L2}+X_{L3}+\cdots+X_{Ln}$ 串联电感电抗

(11-12) $X_{L(tot)}=\frac{1}{\frac{1}{X_{L1}}+\frac{1}{X_{L2}}+\frac{1}{X_{L3}}+\cdots+\frac{1}{X_{Ln}}}$ 并联电感电抗

(11-13) $I=\frac{V}{X_L}$ 欧姆定律

(11-14) $P_{true}=I_{rms}^2R_W$ 有功功率

(11-15) $P_r=V_{rms}I_{rms}$ 无功功率

(11-16) $P_r=\frac{V_{rms}^2}{X_L}$ 无功功率

(11-17) $P_r=I_{rms}^2X_L$ 无功功率

(11-18) $Q=\frac{X_L}{R_W}$ 品质因数

是非测验题

1. 楞次定律指出线圈中的感应电压大小与磁场相对于线圈的变化率成正比。
2. 理想电感没有线圈电阻。
3. 两个并联电感的总电感等于并联电感的积除以和。
4. 并联电感的总电感总是小于最小的并联电感。
5. RL 电路的时间常数由公式 $\tau=R/L$ 给出。
6. 如果串联 RL 电路接直流电源，最大电流受总电感限制。
7. 基尔霍夫电压定律不能用于电感性电路。
8. 电感电抗与频率成正比。
9. 交流电感电路中，电流滞后电感电压。
10. 电感电路的功率曲线频率等于所加电压的频率。

自测题

1. 0.05μH 电感大于
   (a) 0.000 000 5H (b) 0.000 005H
   (c) 0.000 000 008H (d) 0.000 05mH
2. 0.33mH 电感小于
   (a) 33μH (b) 330μH
   (c) 0.05mH (d) 0.0005H
3. 流过电感的电流增大时，存储在磁场中的能量
   (a) 减少 (b) 保持不变
   (c) 增大 (d) 加倍
4. 流过电感的电流加倍，存储的能量
   (a) 加倍 (b) 四倍
   (c) 减半 (d) 不变

5. 线圈的线圈电阻可通过下列方法减小
   (a) 减少匝数　(b) 采用粗导线
   (c) 改变磁心材料　(d) (a) 或 (b)
6. 下列情况铁心线圈的电感增大
   (a) 匝数增大　(b) 去掉铁心
   (c) 增大磁心长度　(d) 用粗导线
7. 四个 10mH 电感串联，总电感为
   (a) 40mH　(b) 2.5mH
   (c) 40 000μH　(d) (a) 和 (c)
8. 1mH、3.3mH 和 0.1mH 电感并联，总电感是
   (a) 4.4mH　(b) 大于 3.3mH
   (c) 小于 0.1mH　(d) (a) 和 (b)
9. 电感、电阻和开关串联接到 12V 电池上，在开关闭合瞬间的电感电压是
   (a) 0V　(b) 12V
   (c) 6V　(d) 4V
10. 正弦电压加在电感两端，当电压频率增高时，电流
   (a) 减小　(b) 增大
   (c) 不变　(d) 瞬间变为零
11. 电感与电阻串联接到正弦电压源，频率设置使得电感电抗等于电阻，如果频率增高，则
   (a) $V_R > V_L$　(b) $V_L < V_R$
   (c) $V_R = V_L$　(d) $V_L > V_R$

故障排除：征兆与原因

参考图 11-40，给每一组征兆确定原因。

1. 征兆：所有电压表读数都是 0V。
   原因：(a) 电源关闭或故障
   (b) L_1开路
   (c) (a) 或 (b)
2. 征兆：所有电压表读数都是 0V。
   原因：(a) L_4完全短路
   (b) L_5完全短路
   (c) L_6完全短路
3. 征兆：电压表 1 读数为 5V，电压表 2 和电压表 3 读数为 0V。
   原因：(a) L_4开路
   (b) L_2开路
   (c) L_5短路
4. 征兆：电压表 1 读数为 4V，电压表 2 读数为 2V，电压表 3 读数为 0V。
   原因：(a) L_3开路
   (b) L_6短路
   (c) (a) 或 (b)
5. 征兆：电压表 1 读数为 4V，电压表 2 读数为 2V，电压表 3 读数为 2V。
   原因：(a) L_3短路
   (b) L_6开路
   (c) (a) 或 (b)

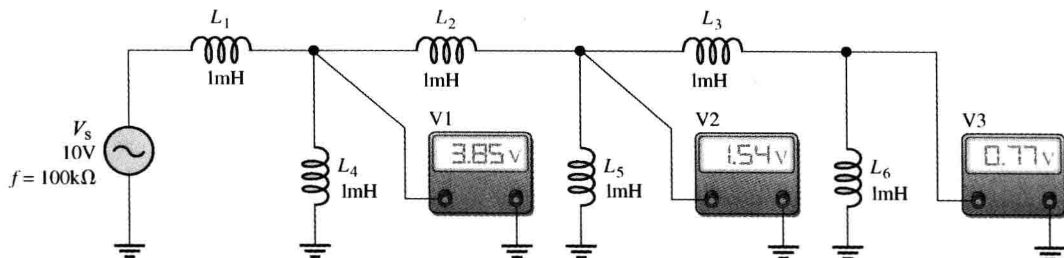


图 11-40　电表指示电路的正确读数

习题

基本习题

11.1 节

1. 将下列电感转换成毫亨。
   (a) 1H　(b) 250μH
   (c) 10μH　(d) 0.0005H
2. 将下列电感转换成微亨。
   (a) 300mH　(b) 0.08H
   (c) 5mH　(d) 0.000 45mH
3. 线圈绕在柱形磁心上，磁心截面积为 $10\times10^{-5}\text{m}^2$，长度为 0.05m，磁导率为 1.26×10^{-6}。试问要得到 30mH 的电感需要绕多少匝？
4. 线圈两端接 12V 电池，线圈电阻为 120Ω，试问线圈电流是多少？
5. 100mH 电感流过 1A 电流，试问存储的能量是

多少？

6. 流过 100mH 线圈的电流以 200mA/s 的速率变化，试问线圈两端的感应电压是多少？

11.3 节

7. 五个电感串联，最小值为 5μH，电感按顺序连接，如果每个电感的值是前一个的 2 倍，试问总电感是多少？

8. 假设需要 50mH 电感，现有 10mH 线圈和 22mH 线圈，试问还需要什么其他值的电感？

9. 试确定下列电感并联的总电感：75μH、50μH、25μH 和 15μH。

10. 手边现有电感的最小值为 12mH，若需要 8mH 的电感，试问可用什么值电感与 12mH 并联得到 8mH 电感？

11. 求图 11-41 中各个电路的总电感。

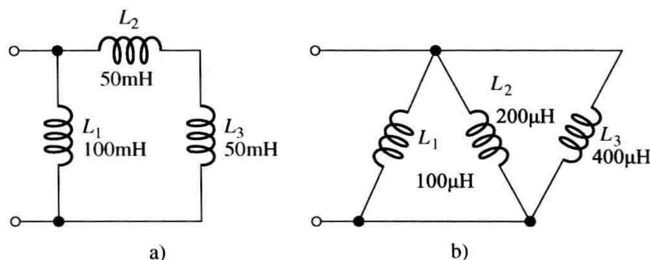


图 11-41

12. 求图 11-42 中各个电路的总电感。

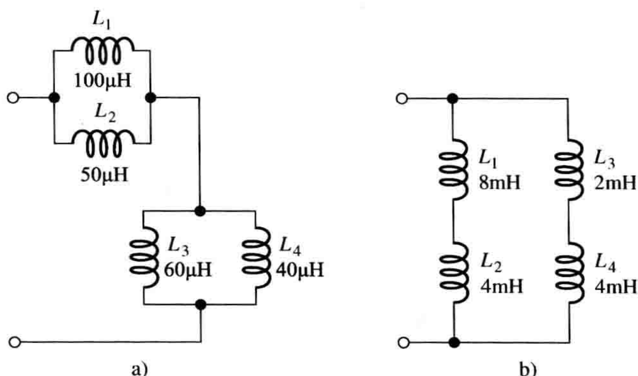


图 11-42

11.4 节

13. 求下列各 RL 组合的时间常数。
   (a) $R=100\Omega$，$L=100\mu H$
   (b) $R=4.7k\Omega$，$L=10mH$
   (c) $R=1.5k\Omega$，$L=3mH$

14. 对于下列串联 RL 电路，确定需要多长时间可建立起满值电流。
   (a) $R=56\Omega$，$L=50\mu H$
   (b) $R=3300\Omega$，$L=15mH$
   (c) $R=22k\Omega$，$L=100mH$

15. 图 11-43 中的电路初始无电流，求开关闭合后下列时刻的电感电压。
   (a) 10μs (b) 20μs (c) 30μs
   (d) 40μs (e) 50μs

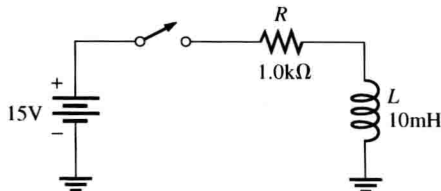
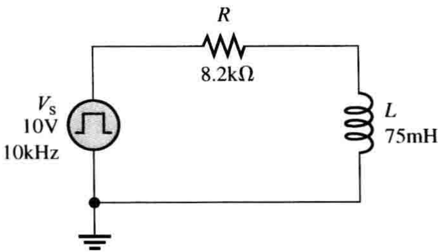


图 11-43



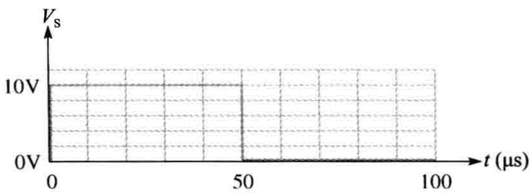


图 11-44

16. 在图 11-44 中计算下列每个时刻的电流，假设电感和电压源均为理想。

 (a) 10μs (b) 20μs (c) 30μs

11.5 节

17. 当两端加载电压频率为 500kHz 时，求图 11-41 中各个电路的总电抗。
18. 当所加信号频率为 400kHz 时，求图 11-42 中各电路的总电抗。
19. 求图 11-45 中的总电流有效值，试问流过 L_1 和 L_2 的电流分别是多少？

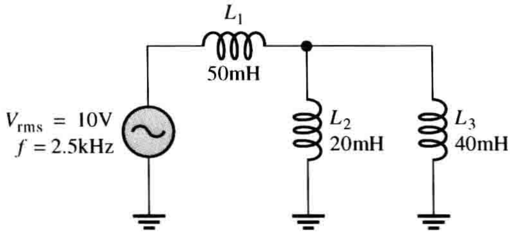


图 11-45

20. 若图 11-42 中电路输入电压的有效值为 10V，试问什么频率时各个电路能产生 500mA 有效值电流？
21. 求图 11-45 中电路的无功功率，忽略线圈电阻。

高级习题

22. 求图 11-46 中电路的时间常数。
23. 求下列各个时刻图 11-44 中电感两端的电压。

 (a) 60μs (b) 70μs (c) 80μs

24. 试问 60μs 时图 11-44 中电阻两端的电压是多少？
25. (a) 图 11-46 中开关闭合 1.0μs 时电感中的电流是多少？

 (b) 过去 5τ 后电流是多少？

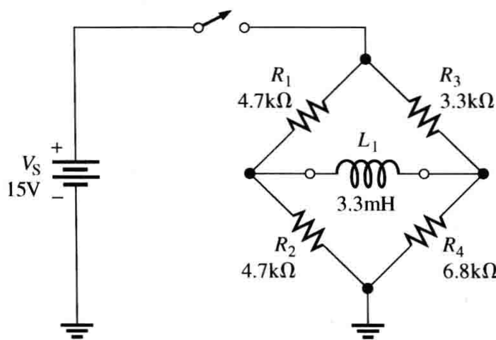


图 11-46

26. 对于图 11-46 所示的电路，假设开关闭合 5τ 时间以上再断开，试问开关断开 1.0μs 时电感的电流是多少？
27. 在系统举例 11-2 中，假设 f =550kHz，试问每个电感的电抗是多少？两个电感串联的总电抗是多少？
28. 对于系统举例 11-2，假设需要改变 L_1 来得到 8%的反馈，试问新的电感值是多少？

Multisim 仿真故障排除习题

29. 打开文件 P11-29，并测试电路，如存在故障，请识别故障。
30. 打开文件 P11-30 并测试电路，如果存在故障，请识别故障。
31. 确定文件 P11-31 中电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
32. 找出并指明文件 P11-32 中电路的故障。
33. 文件 P11-33 的电路中是否存在短路或开路？如果有，识别故障元件。

各节测试题答案

11.1 节

1. 决定电感的参数有线圈匝数、磁导率、磁心截面积和磁心长度。
2. (a) N 增大时，L 增大

 (b) 磁心长度增大时，L 减小

 (c) 截面积减小时，L 减小

 (d) 对于空气磁心，L 减小

3. 所有导线都有电阻，而电感是由导线绕成的，

所以绕组中总是存在电阻。

4. 相邻的线圈匝如同电容器的极板，产生小的电容。

11.2 节

1. 电感的两个种类是固定电感和可变电感。
2. (a) 空气磁心
   (b) 铁磁心
   (c) 可变

11.3 节

1. 串联电感相加。
2. $L_T = 2600\mu H$
3. $L_T = 5 \times 100mH = 500mH$
4. 并联总电感小于最小的并联电感。
5. T
6. (a) $L_T = 7.69mH$ (b) $L_T = 24\mu H$

11.4 节

1. $V_L = 10mA \times 10\Omega = 100mV$
2. 初始 $i = 0A$，$v_L = 20V$。
3. 5τ 后，$v_L = 0V$。
4. $\tau = 500\mu H / 1.0k\Omega = 500ns$，$i_L = 3.93mA$。

11.5 节

1. 电感中电压超前电流 90°。
2. $X_L = 2\pi fL = 3.14k\Omega$
3. $f = X_L / 2\pi L = 2.55MHz$
4. $I_{rms} = 15.9mA$
5. $P_{true} = 0W$，$P_r = 458mVAR$

11.6 节

1. 传导性噪声和辐射性噪声
2. 电磁干扰
3. 放置在导线上增大其电感，构成射频扼流圈

例题中相关问题答案

例 11-1 157mH

例 11-2 150μH

例 11-3 20.3μH

例 11-4 227ns

例 11-5 $I_F = 17.6mA$，$\tau = 147ns$

1τ 时：$i = 11.1mA$；$t = 147ns$

2τ 时：$i = 15.1mA$；$t = 294ns$

3τ 时：$i = 16.7mA$；$t = 441ns$

4τ 时：$i = 17.2mA$；$t = 588ns$

5τ 时：$i = 17.4mA$；$t = 735ns$

例 11-6 0.2ms 时：$i = 0.215mA$

0.8ms 时：$i = 0.0125mA$

例 11-7 若忽略 R_W，10V

例 11-8 3.83mA

例 11-9 6.7mA

例 11-10 1100Ω

例 11-11 (a) 7.17kΩ (b) 1.04kΩ

例 11-12 573mA

例 11-13 P_r减小。

是非测验题答案

1.F 2.T 3.T 4.T 5.F 6.F 7.F 8.F 9.T 10.F

自测题答案

1. (c) 2. (d) 3. (c) 4. (b) 5. (d) 6. (a) 7. (d) 8. (c) 9. (b) 10. (a) 11. (d)

故障排除：征兆与原因的答案

1. (c) 2. (a) 3. (b) 4. (a) 5. (b)

第12章

RL 电路

本章目标

- 描述 RL 电路中电流与电压的关系
- 确定串联 RL 电路的阻抗与相位角
- 分析串联 RL 电路
- 确定并联 RL 电路的阻抗与相位角
- 分析并联 RL 电路
- 分析串并联 RL 电路
- 确定 RL 电路的功率
- 讨论 RL 电路作为滤波器的工作原理
- 排除 RL 电路故障

RL 电路包含电阻和电感。本章介绍串联和并联 *RL* 电路及其对正弦电压的响应，还讨论 *RL* 的串并联组合电路，*RL* 电路中的功率以及功率因数，提出了改善功率因数的方法，最后介绍 *RL* 电路的常见故障排除。

有抗电路的分析方法与前面学过的直流电路类似，有抗电路问题每次只能针对一个频率且必须采用相量数学方法。系统中感兴趣的频率常常为市电频率（50Hz 或 60Hz），虽然这时的电感不一定是原型元件，而可能是电动机的绕组或变压器，但我们仍然可以应用基本 *RL* 理论。

学习本章时，要注意对照比较 *RL* 电路和 *RC* 电路的响应，注意它们的相同点和不同点。

12.1 *RL* 电路的正弦响应

和 *RC* 电路一样，当输入电压是正弦时，*RL* 电路的任何电压和电流都是正弦的。阻抗在电压和电流之间引入了相移，相移的大小取决于电阻和电感电抗的相对值。由于存在线圈电阻，电感通常不像电阻或电容那样“理想”，但是为了演示我们仍然常将电感视为理想元件来处理。

学习完本节内容，应该能够

- 说明 *RL* 电路电流和电压的关系；
- 讨论电压和电流的波形；
- 讨论相移。

在 *RL* 电路中，电阻电压和电流滞后于电源电压，电感电压超前于电源电压。理想情况下，电流与电感电压之间的相位角总是 90°。一般情况下的相位关系如图 12-1 所示，注意它与第 10 章讨论的 *RC* 电路有什么不同。

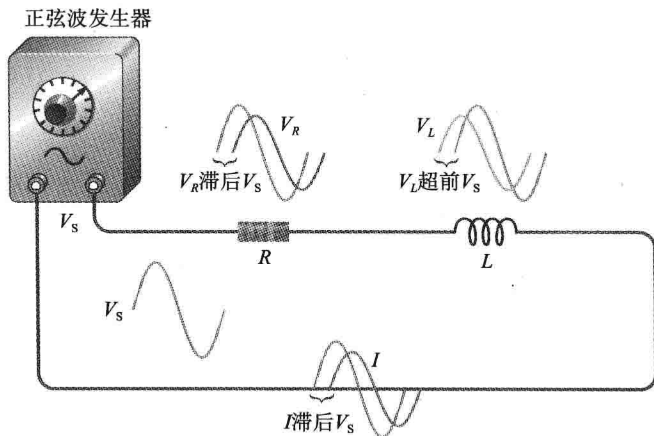


图 12-1　V_R、V_L 和 I 相对于电源电压的一般相位关系的正弦响应演示（V_R 和 I 同相位，V_R 和 V_L 彼此相位差 90°）

电压和电流的幅度与相位关系取决于电阻与电感电抗的值。当电路为纯电感时，电源电压与总电流的相位角为 90°，电流滞后于电压。当电路中存在电阻和电感电抗的组合时，相位角

在零和 90°之间，由电阻和电感电抗的相对值确定。由于所有电感都含有线圈电阻，所以理想条件下可以接近但在实践中永远不可能达到。

本节测试题

1. 1kHz 正弦电压加在 RL 电路上，试问产生的电流的频率是多少？
2. 当 RL 电路的电阻大于电感电抗时，电源电压与总电流之间的相位角是靠近 0°还是靠近 90°？

12.2　串联 RL 电路的阻抗与相位角

在 10.2 节讨论 RC 电路时引入了阻抗，阻抗表示为对正弦电流的总阻碍，与 RC 电路一样，阻抗是电阻性分量和电抗性分量的组合，可以用相量表示。由于存在相位差，所以总阻抗必须作相量来处理。

学习完本节内容，应该能够

- 确定串联 RL 电路的阻抗与相位角；
- 画出阻抗三角形；
- 计算阻抗的幅值；
- 计算相位角。

串联 RL 电路的阻抗是其对正弦电流的总阻碍，单位为 Ω。相位角是总电流与电源电压之间的相位差。阻抗（Z）由电阻（R）和电感电抗（X_L）确定，如图 11-2 所示。

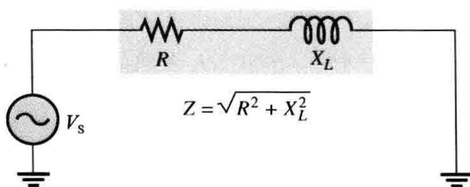


图 12-2　串联 RL 电路的阻抗

在交流电路的分析中，R 和 X_L 均作为相量处理，如图 12-3a 中的相量图所示，X_L 相对于 R 呈现+90°角度，这个关系源自电感电压超前于电流 90°的事实。由于 Z 是 R 和 X_L 的相量之和，其相量表示如图 12-3b 所示。重新按图 12-3c 布局相量，形成一个直角三角形，这就是前面已经学过的阻抗三角形。每个相量的长度表示这个量的幅值，θ 是 RL 电路中电源电压与总电流之间的相位角。

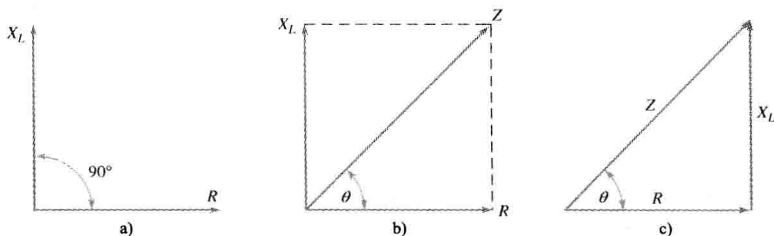


图 12-3　串联 RL 电路阻抗三角形的导出

串联 RL 电路阻抗 Z 的幅值可以由电阻和电抗表示为

$$Z=\sqrt{R^2+X_L^2} \tag{12-1}$$

式中 Z 用 Ω 表示。

相位角 θ 表示为

$$\theta=\arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{12-2}$$

【例 12-1】　求图 12-4 中电路的阻抗与相位角，画出阻抗三角形。

解： 阻抗为

$$Z=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{(5.6\text{k}\Omega)^2+(10\text{k}\Omega)^2}=11.5\text{k}\Omega$$

相位角的值为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{10\text{k}\Omega}{5.6\text{k}\Omega}\right) = 60.8°$$

电源电压超前于电流 60.8°，阻抗三角形如图 12-5 所示。

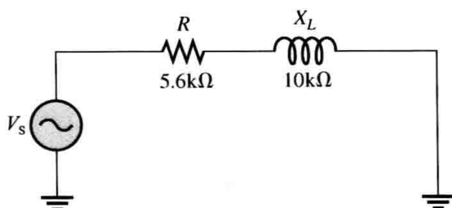


图 12-4

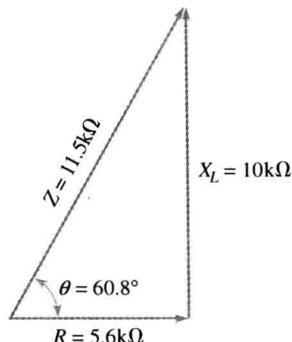


图 12-5

相关问题：串联 RL 电路的 $R=1.8\text{k}\Omega$、$X_L=950\Omega$，求阻抗与相位角。

本节测试题

1. 试问串联 RL 电路的电源电压是超前还是滞后于电流？
2. 当相位角为 45°时，试问 X_L 和 R 的关系是什么？
3. 试问 RL 电路的相位角与 RC 电路的相位角有何不同？
4. 串联 RL 电路的电阻为 33kΩ，电感电抗为 50kΩ，求 Z 和 θ。

12.3 串联 RL 电路分析

本节应用欧姆定律和基尔霍夫电压定律确定串联 RL 电路的电压、电流和阻抗，同时介绍 RL 超前与滞后电路。

学习完本节内容，应该能够

- 分析串联 RL 电路；
- 在串联 RL 电路中应用欧姆定律与基尔霍夫电压定律；
- 确定电压和电流的相位关系；
- 说明阻抗和相位角如何随频率变化；
- 讨论与分析 RL 滞后电路；
- 讨论与分析 RL 超前电路。

12.3.1 欧姆定律

欧姆定律在串联 RL 电路中的应用涉及 Z、V 和 I 三个量，第 10 章中适用于 RC 电路的欧姆定律的三个等价形式同样适用于 RL 电路，此处再列写出来：

$$V = IZ \qquad I = \frac{V}{Z} \qquad Z = \frac{V}{I}$$

下面的例子说明欧姆定律的应用。

【例 12-2】 图 12-6 中电流为 200μA，求电源电压。

解： 从公式（11-10）可得电感电抗为

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 10\text{kHz} \times 100\text{mH} = 6.28\text{k}\Omega$$

阻抗为

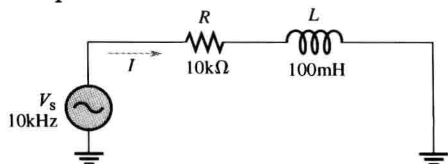


图 12-6

$$Z=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{(10\text{k}\Omega)^2+(6.28\text{k}\Omega)^2}=11.8\text{k}\Omega$$

应用欧姆定律得

$$V_S=IZ=200\mu\text{A}\times 11.8\text{k}\Omega=2.36\text{V}$$

相关问题：如果图 12-6 中的电源电压为 5V，试问电流为多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E12-02，在频率为 10kHz、5kHz 和 20kHz 时测量电流，并解释测量结果。

12.3.2 电流与电压的相位关系

在串联 *RL* 电路中，流过电阻和电感的电流相同，电阻电压与电流同相位，而电流滞后于电感电压 90°，因此，电阻电压 V_R和电感电压 V_L之间存在 90°的相位差，如图 12-7 所示。

根据基尔霍夫电压定律，回路电压降之和必须等于电源电压，然而由于 V_R和 V_L不同相位，它们必须以相量相加，V_L超前于 V_R90°，如图 12-8a 所示。图 12-8b 显示 V_S为 V_R和 V_L的相量之和，公式表示为

$$V_S=\sqrt{V_R^2+V_L^2} \tag{12-3}$$

电阻电压与电源电压之间的相位角可表示为

$$\theta=\arctan\left(\frac{V_L}{V_R}\right) \tag{12-4}$$

因为电阻电压与电流同相位，所以式 (12-4) 的 θ 同样表示了电源电压与电流之间的相位角，与 $\arctan(X_L/R)$ 等价。

图 12-9 显示了图 12-7 中波形的电压与电流相量图。

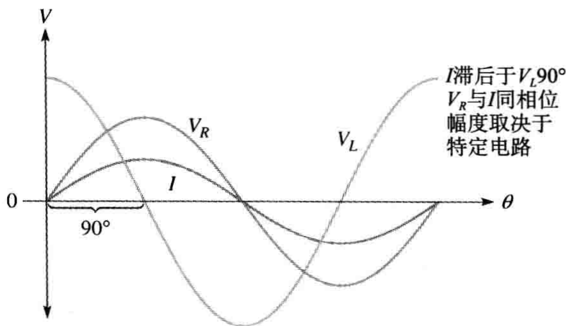


图 12-7 串联 *RL* 电路中电流与电压的相位关系

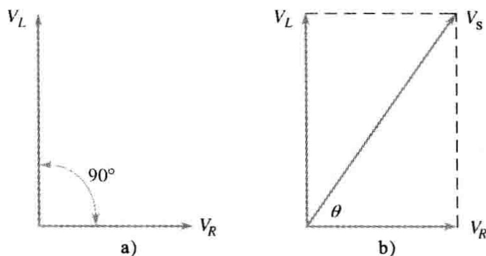


图 12-8 图 12-7 中波形的电压相量图

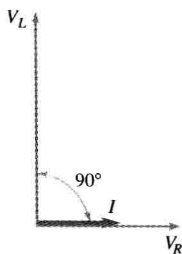


图 12-9 图 12-7 中波形的电压与电流相量图

【例 12-3】 求图 12-10 中的电源电压和相位角，画出电压相量图。

解： 由于 V_R和 V_L之间存在 90°的相位差，不能直接相加，因此电源电压是 V_R和 V_L的相量之和。

$$V_S=\sqrt{V_R^2+V_L^2}=\sqrt{(50\text{V})^2+(35\text{V})^2}=61\text{V}$$

电阻电压与电源电压之间的相位角为

$$\theta=\arctan\left(\frac{V_L}{V_R}\right)=\arctan\left(\frac{35\text{V}}{50\text{V}}\right)=35°$$

电压相量图如图 12-11 所示。

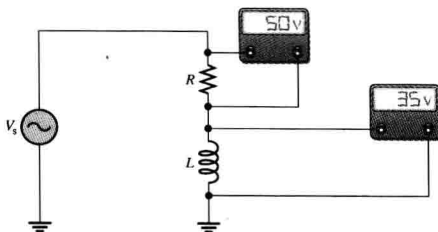


图 12-10

相关问题：试问由已知的条件能否确定图 12-10 中的电流？

12.3.3　阻抗与相位角随频率的变化

我们知道，电感电抗与频率成正比，当 X_L 增大时，总阻抗也增大；X_L 减小时，总阻抗也减小，因此，RL 电路的 Z 直接取决于频率。

图 12-12 演示了串联 RL 电路的电压与电流如何随频率增高或降低而变化，图中电源电压保持恒定值。图 12-12a 图显示随着频率的增高，X_L 增大将导致电感两端的电压增大而电路中电流减小，所以 V_L 增大 V_R 减小，由于电路中同样总电压下电流较小，故 Z 较大。

图 12-12b 显示随着频率降低，由于 X_L 减小，电感两端的电压减小，Z 也减小，导致电流增大，电流的增大使电阻两端的电压增大。

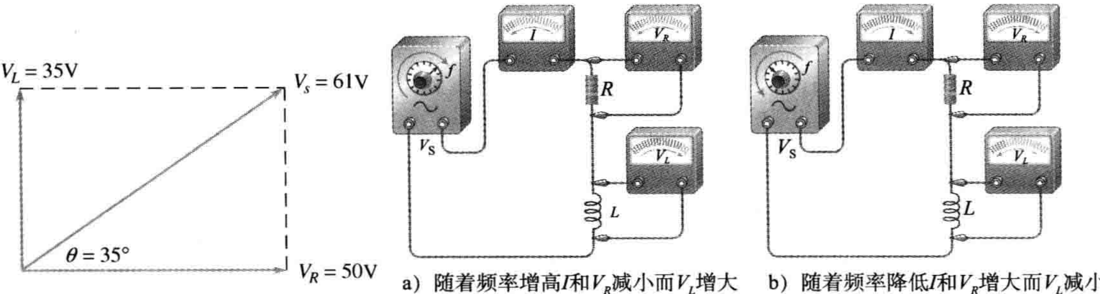


图　12-11

图 12-12　演示当电源频率变化时阻抗改变对电压和电流的影响，电源电压保持恒定值

Z 和 X_L 的变化可通过图 12-13 进行观察。当频率增高时，由于 V_S 恒定使 Z 两端的电压保持恒定（$V_S=V_Z$），但是 L 两端的电压增大，由欧姆定律（$Z=V_Z/I$）可知，电流减小表示 Z 在增大，电流减小同样说明 X_L 在增大，对应 X_L 增大 V_L 也增大。

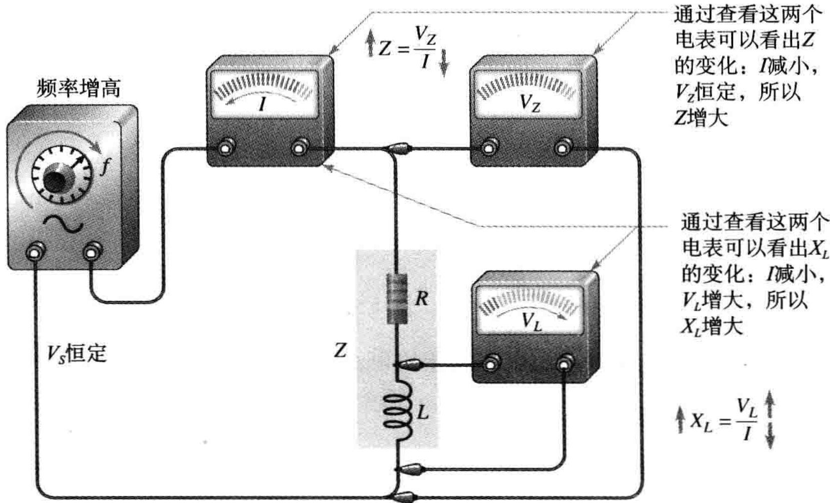


图 12-13　通过查看电压表回顾欧姆定律观察 Z 和 X_L 随频率的变化

小贴士　我们知道，有些万用表具有相对低的频率响应，此外还有一些应该知道的事情。一个是多数交流电表只在所测量的波形为正弦时才是准确的。另一个是小交流电压测量精度通

常小于直流测量精度。最后，负载效应可能会影响电表读数的准确性。

由于 X_L 是引起串联 RL 电路相位角的因素，因此 X_L 的变化将产生相位角的变化。频率增高时 X_L 变大，相位角增大；频率降低时 X_L 变小，相位角减小。因为 I 和 V_R 同相位，所以 V_S 与 V_R 之间的角度就是电路的相位角。利用阻抗三角形演示相位角随频率的变化如图 12-14 所示。

【例 12-4】 对于图 12-15 所示串联 RL 电路，求下列频率时的阻抗和相位角：

(a) 10kHz (b) 20kHz (c) 30kHz

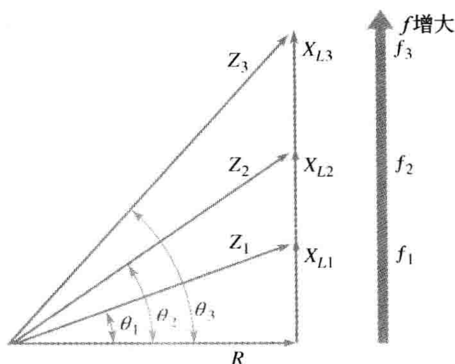


图 12-14 相位角随频率增高而增大

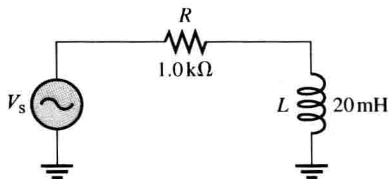


图 12-15

解：(a) 对 f=10kHz，计算阻抗如下

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 10\text{kHz} \times 20\text{mH} = 1.26\text{k}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2 + (1.26\text{k}\Omega)^2} = 1.61\text{k}\Omega$$

相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{1.26\text{k}\Omega}{1.0\text{k}\Omega}\right) = 51.6°$$

(b) 对 f=20kHz

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 20\text{kHz} \times 20\text{mH} = 2.51\text{k}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2 + (2.51\text{k}\Omega)^2} = 2.70\text{k}\Omega$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{2.51\text{k}\Omega}{1.0\text{k}\Omega}\right) = 68.3°$$

(c) 对 f=30kHz

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 30\text{kHz} \times 20\text{mH} = 3.77\text{k}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2 + (3.77\text{k}\Omega)^2} = 3.90\text{k}\Omega$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{3.77\text{k}\Omega}{1.0\text{k}\Omega}\right) = 75.1°$$

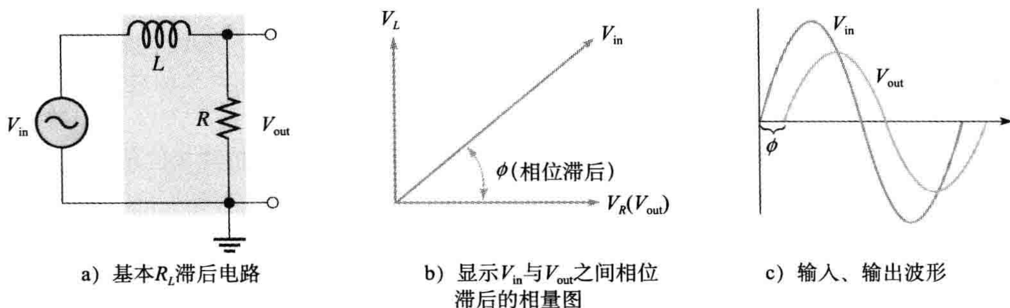
注意，随着频率的增高，X_L、Z 和 θ 都增大。

相关问题：如果 f =100kHz，试求图 12-15 中的 Z 和 θ。

12.3.4 *RL* 滞后电路

RL 滞后电路是一个相移电路，其输出电压滞后于输入电压一个特定的角度 ϕ。基本串联 RL 滞后电路如图 12-16a 所示，输出电压取自电阻两端，而输入电压是加在整个电路的总电压。电压关系如图 12-16b 的相量图所示，波形图如图 12-16c 所示。注意输出电压 V_{out} 滞后于

V_{in}一个角度，记为 ϕ，它与电路的相位角相同，因为V_R和 I 同相位。



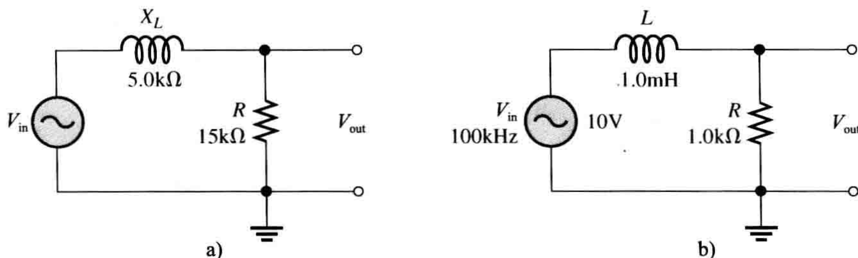
a) 基本R_L滞后电路　　b) 显示V_{in}与V_{out}之间相位滞后的相量图　　c) 输入、输出波形

图 12-16　RL 滞后电路（$V_{out}=V_R$）

相位滞后可以表示为

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{12-5}$$

【例 12-5】 计算图 12-17 中各个电路的相位滞后。



a)　　b)

图 12-17

解： 对于图 12-17a 中的电路

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{5.0\text{k}\Omega}{15\text{k}\Omega}\right) = 18.4°$$

输出滞后于输入 18.4°。

对于图 12-17b 中的电路，首先确定电感电抗

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 100\text{kHz} \times 1.0\text{mH} = 628\Omega$$

相位滞后为

$$\phi = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{628\Omega}{1.0\text{k}\Omega}\right) = 32.1°$$

输出滞后于输入 32.1°。

相关问题：某滞后电路 $R=55.6\text{k}\Omega$、$X_L=3.5\text{k}\Omega$，试求输入与输出之间的相位滞后。

相位滞后电路可以看成是一个分压器，一部分电压降在 L 两端，一部分降在 R 两端。输出电压可以用下面的公式确定：

$$V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{in} \tag{12-6}$$

【例 12-6】 例 12-5 中图 12-17b 所示电路的输入电压有效值为 10V，求该滞后电路的输出电压，画出输入电压和输出电压的波形关系。其中相位滞后（32.1°）和 X_L（628Ω）已在例 12-5中求得。

解： 利用公式（12-6）求图 12-17b 中滞后电路的输出电压。

$$V_{out}=\left(\frac{R}{\sqrt{R^2+X_L^2}}\right)V_{in}=\frac{1.0\text{k}\Omega}{1.18\text{k}\Omega}\times 10\text{V}=8.47\text{V}$$

波形如图 12-18 所示。

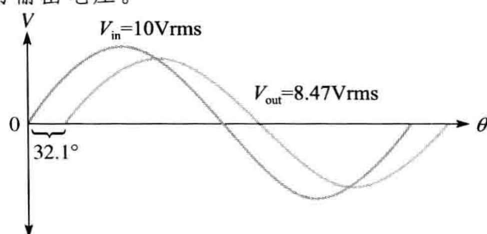


图 12-18

相关问题：滞后电路 $R=4.7\text{k}\Omega$、$X_L=6\text{k}\Omega$，如果输入电压有效值为 20V，试问输出电压是多少？

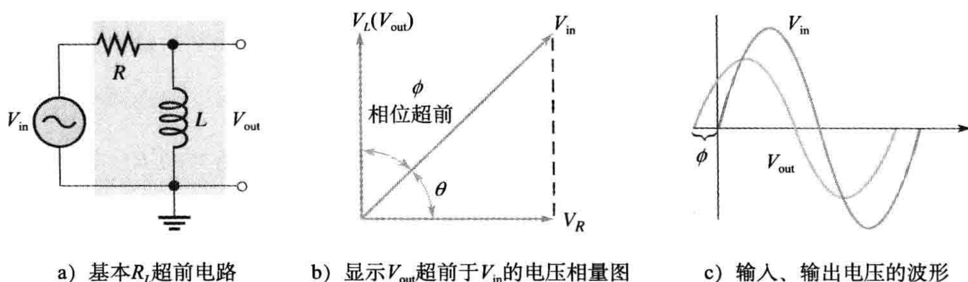
Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E12-06，测量输出电压并与计算值比较。

频率对滞后电路的影响 由于电路的相位角和相位滞后相同，频率的升高将引起相位滞后的增大；同样，频率升高会使输出电压的幅度减小，因为 X_L 变大使得电感两端的电压降得更多，且电阻两端的电压变得更小。

12.3.5 *RL* 超前电路

RL 超前电路是一个相移电路，其输出电压超前于输入电压一个特定的角度 ϕ，基本串联 *RL* 超前电路如图 12-19a 所示。注意它与滞后电路的区别。这里输出电压取自电感两端而不是电阻两端。电压关系如图 12-19b 的相量图所示，波形如图 12-19c 所示。输出电压 V_{out} 超前于 V_{in} 的角度（相位超前）为 90°与电路相位角 θ 之差。



a）基本 R_L 超前电路　b）显示 V_{out} 超前于 V_{in} 的电压相量图　c）输入、输出电压的波形

图 12-19 *RL* 超前电路（$V_{out}=V_L$）

因为 $\theta=\tan^{-1}(X_L/R)$，相位超前 ϕ 可表示为

$$\phi=90^\circ-\arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) \tag{12-7}$$

等效于，

$$\phi=\text{arc}\tan\left(\frac{R}{X_L}\right)$$

相位超前电路也可以看做分压器，L 两端的电压作为输出电压，输出电压表达式为

$$V_{out}=\left(\frac{X_L}{\sqrt{R^2+X_L^2}}\right)V_{in} \tag{12-8}$$

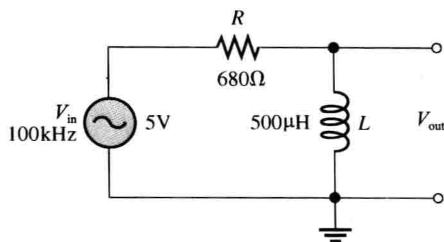


图 12-20

【例 12-7】 求图 12-20 中超前电路的相位超前量与输出电压。

解： 首先求电感电抗。

$$X_L=2\pi fL=2\pi\times 100\text{kHz}\times 500\mu\text{H}=314\Omega$$

相位超前为

$$\phi = 90° - \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) = 90° - \arctan\left(\frac{314\Omega}{680\Omega}\right) = 65.2°$$

输出超前输入65.2°。

输出电压为

$$V_{out} = \left(\frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{in} = \frac{314\Omega}{\sqrt{(680\Omega)^2 + (314\Omega)^2}} \times 5V = 2.1V$$

相关问题：某超前电路 $R = 2.2k\Omega$、$X_L = 1k\Omega$，试问相位超前是多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 文件 E12-07，测量输出电压并与计算值比较。

频率对超前电路的影响 由于电路的相位角 θ 随频率的升高而增大，因此频率升高时相位超前减小，同样，频率升高会使输出电压的幅度增大，因为 X_L 变大使得总电压在电感两端降得更多。

本节测试题

1. 某串联 RL 电路中，$V_R = 2V$，$V_L = 3V$，试问总电压的幅度是多少？
2. 在问题1中，相位角是多少？
3. 试问当串联 RL 电路中电源电压的频率升高时，电感电抗会怎么变化？阻抗如何变化？相位角怎样变化？
4. 某 RL 超前电路由 3.3kΩ 电阻和 15mH 电感构成，求频率为 5kHz 时输入与输出之间的相位超前。
5. 某 RL 滞后电路与问题4中的超前电路具有相同的元件值，试问频率为 5kHz、输入电压的有效值为 10V 时输出电压是多少？

12.4 并联 RL 电路的阻抗与相位角

本节我们将学习如何确定并联 RL 电路的阻抗及相位角，还要介绍并联 RL 电路的电感电纳和导纳。

学习完本节内容，应该能够

- 确定并联 RL 电路的阻抗及相位角；
- 以积除以和的形式表示总阻抗；
- 用 R 和 X_L 表示相位角；
- 确定电感电纳和导纳；
- 将导纳转换为阻抗。

基本并联 RL 电路如图 12-21 所示，积除以和形式的阻抗表达式为

$$Z = \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \tag{12-9}$$

用 R 和 X_L 表示的电源电压与总电流的相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{R}{X_L}\right) \tag{12-10}$$

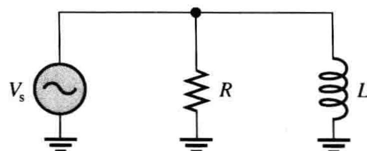


图 12-21 并联 RL 电路

【例 12-8】 对图 12-22 中的各个电路，求阻抗与相位角。

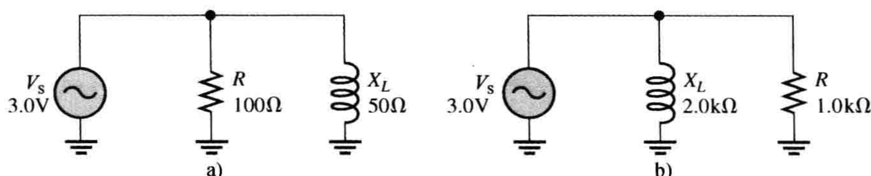


图 12-22

解： 对于图 12-22a 中的电路，阻抗与相位角为

$$Z=\frac{RX_L}{\sqrt{R^2+X_L^2}}=\frac{100\Omega\times50\Omega}{\sqrt{(100\Omega)^2+(50\Omega)^2}}=44.7\Omega$$

$$\theta=\arctan\left(\frac{R}{X_L}\right)=\arctan\left(\frac{100\Omega}{50\Omega}\right)=63.4^\circ$$

对于图 12-22b 中的电路，

$$Z=\frac{1.0\text{k}\Omega\times2.0\text{k}\Omega}{\sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2+(2.0\text{k}\Omega)^2}}=894\Omega$$

$$\theta=\arctan\left(\frac{R}{X_L}\right)=\arctan\left(\frac{1.0\text{k}\Omega}{2.0\text{k}\Omega}\right)=26.6^\circ$$

电压超前于电流，而并联 RC 电路的情况是电压滞后于电流。

相关问题：并联 RL 电路中 $R=10\text{k}\Omega$、$X_L=14\text{k}\Omega$，求 Z 和 θ。

电导、电纳和导纳

从 10.4 节我们知道，电导（G）是电阻的倒数，电纳（B）是电抗的倒数，而导纳（Y）则是阻抗的倒数。

对于并联 RL 电路，电导（G）可表示为

$$G=\frac{1}{R} \tag{12-11}$$

电感电纳（B_L）可表示为

$$B_L=\frac{1}{X_L} \tag{12-12}$$

导纳（Y）可表示为

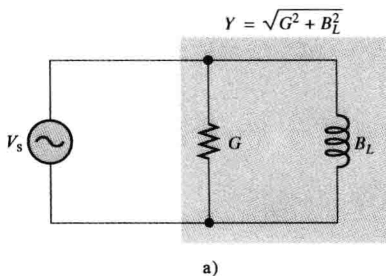
$$Y=\frac{1}{Z} \tag{12-13}$$

和 RC 电路一样，G、B_L和 Y 的单位都是西门子（S）。

在图 12-23a 所示的基本并联 RL 电路中，总导纳是电导和电感电纳的相量和，如图 12-23b 所示。

$$Y_{\text{tot}}=\sqrt{G^2+B_L^2} \tag{12-14}$$

【例 12-9】 求图 12-24 中电路的总导纳，然后将其转换为阻抗。



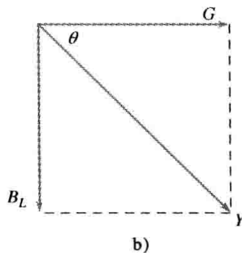


图 12-23 并联 RL 电路的导纳

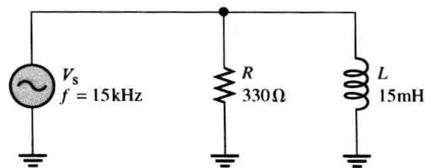


图 12-24

解： 为求导纳 Y，首先计算 G 和 B_L 的值。由于 $R=330\Omega$，

$$G=\frac{1}{R}=\frac{1}{330\Omega}=3.03\text{mS}$$

电感电抗为

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 15\text{kHz} \times 15\text{mH} = 1.41\text{k}\Omega$$

电感电纳为

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{1.41\text{k}\Omega} = 0.707\text{mS}$$

因此，总导纳为

$$Y_{\text{tot}} = \sqrt{G^2 + B_L^2} = \sqrt{(3.03\text{mS})^2 + (0.707\text{mS})^2} = 3.11\text{mS}$$

转换为阻抗

$$Z = \frac{1}{Y_{\text{tot}}} = \frac{1}{3.11\text{mS}} = 321\Omega$$

相关问题：如果频率降低到5kHz，求图12-24中电路的总导纳。

本节测试题

1. 如果Y=50mS，试问Z的值是多少？
2. 某并联RL电路中R=470Ω、X_L=750Ω，求导纳。
3. 在问题2的电路中，试问总电流是超前还是滞后于电源电压？相位角是多少？

12.5 并联RL电路分析

本节应用欧姆定律和基尔霍夫电流定律分析并联RL电路，研究并联RL电路的电压和电流之间的关系。

学习完本节内容，应该能够

- 分析并联RL电路；
- 将欧姆定律和基尔霍夫电流定律应用到并联RL电路；
- 确定总电流和相位角。

下列的例子应用欧姆定律来分析并联RL电路。

【例12-10】 求图12-25中电路的总电流与相位角。

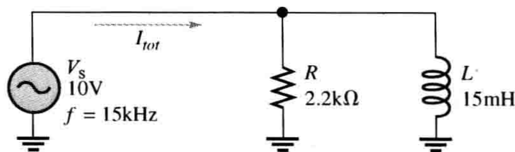


图 12-25

解：首先求总导纳，电感电抗为

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 15\text{kHz} \times 15\text{mH} = 1.41\text{k}\Omega$$

电导为

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{2.2\text{k}\Omega} = 455\mu\text{S}$$

电感电纳为

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{1.41\text{k}\Omega} = 709\mu\text{S}$$

因此，总导纳为

$$Y_{\text{tot}} = \sqrt{G^2 + B_L^2} = \sqrt{(455\mu\text{S})^2 + (709\mu\text{S})^2} = 842\mu\text{S}$$

然后应用欧姆定律计算总电流。

$$I_{\text{tot}} = VY_{\text{tot}} = 10\text{V} \times 842\mu\text{S} = 8.42\text{mA}$$

相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{R}{X_L}\right) = \arctan\left(\frac{2.2\text{k}\Omega}{1.41\text{k}\Omega}\right) = 57.3°$$

总电流为8.42mA，滞后于电源电压57.3°。

相关问题：若图12-25中的频率降到8.0kHz，求总电流与相位角。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E12-10，测量总电流和各支路电流。将频率改成 8.0kHz 并测量 I_{tot}。

电流与电压的相位关系

图 12-26a 显示了基本并联 RL 电路的所有电压和电流，电源电压 V_S 同时加在电阻和电感支路两端，所以 V_S、V_R 和 V_L 相位和幅度都相同，总电流 I_{tot} 在连接点分成两个支路电流 I_R 和 I_L，电压和电流的相量图如图 12-26b 所示。

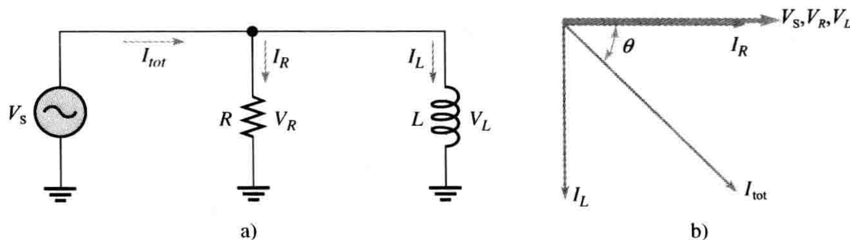


图 12-26　并联 RL 电路的电流与电压。a）图中电流方向是瞬时变化的，每个周期内电压方向反转时电流方向也跟着反转

流过电阻的电流与电压同相位，而通过电感的电流滞后于电压及电阻电流 90°。根据基尔霍夫电流定律，总电流是两个分支电流的相量和，可表示为

$$I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} \tag{12-15}$$

电阻电流与总电路之间的相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{I_L}{I_R}\right) \tag{12-16}$$

【例 12-11】　对于图 12-25 中的电路，画出电流相量图，说明电流与电源电压之间的相位关系。

解： 电导、电纳、导纳、总电流和相位角已在例 12-10 中计算出来。

$$G = 455\mu S$$
$$B_L = 709\mu S$$
$$Y_{tot} = 842\mu S$$
$$I_{tot} = 8.42mA$$
$$\theta = 57.3°$$

支路电流为

$$I_R = GV = 455\mu S \times 10V = 4.55mA\ (\text{与 } V_S \text{同相位})$$
$$I_L = B_L V = 709\mu S \times 10V = 7.09mA\ (\text{滞后于 } V_S\ 90°)$$

电流相量图如图 12-27 所示，加粗相量表示电路的电压。

相关问题：若在图 12-25 的电路中有第二个 15mH 电感与第一个电感并联，求 I_{tot}。

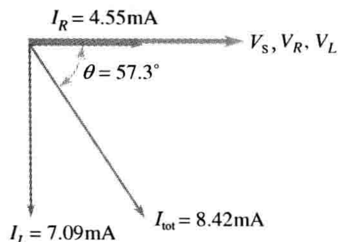


图　12-27

本节测试题

1. 并联 RL 电路的导纳为 4mS，电源电压为 8V，试问总电流是多少？

2. 某并联 RL 电路中，电阻电流为12mA，电感电流为20mH，求相位角和总电流。
3. 试问并联 RL 电路中电感电流与电源电压之间的相位角是多少？

12.6 串并联 RL 电路分析

本节应用前面几节学习的内容来分析 R 和 L 元件串联与并联组合的电路。

学习完本节内容，应该能够

- 分析串并联 RL 电路；
- 确定总阻抗与相位角；
- 计算电流与电压。

下面两个例子说明了串并联有抗电路的分析过程。

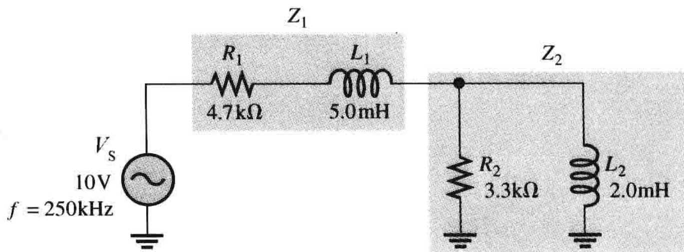


图 12-28

【例 12-12】 在图 12-28 所示的串并联 RL 电路中，求下列值：

(a) Z_{tot}　(b) I_{tot}　(c) θ

解：(a) 首先计算总电感电抗的大小。

$$X_{L1} = 2\pi f L_1 = 2\pi \times 250\text{kHz} \times 5.0\text{mH} = 7.85\text{k}\Omega$$

$$X_{L2} = 2\pi f L_2 = 2\pi \times 250\text{kHz} \times 2.0\text{mH} = 3.14\text{k}\Omega$$

一种方法是对电路的并联部分求串联等效电阻和等效电抗，然后电阻相加（$R_1 + R_{eq}$）得到总电阻，电抗相加（$X_{L1} + X_{L(eq)}$）得总电抗，从而得到总阻抗。

求并联部分（Z_2）的阻抗如下：

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{3.3\text{k}\Omega} = 303\mu\text{S}$$

$$B_{L2} = \frac{1}{X_{L2}} = \frac{1}{3.14\text{k}\Omega} = 318\mu\text{S}$$

$$Y_2 = \sqrt{G_2^2 + B_{L2}^2} = \sqrt{(303\mu\text{S})^2 + (318\mu\text{S})^2} = 439\mu\text{S}$$

因此

$$Z_2 = \frac{1}{Y_2} = \frac{1}{439\mu\text{S}} = 2.28\text{k}\Omega$$

与电路并联部分相关的相位角为

$$\theta_p = \arctan\left(\frac{R_2}{X_{L2}}\right) = \arctan\left(\frac{3.3\text{k}\Omega}{3.14\text{k}\Omega}\right) = 46.4°$$

将阻抗分解成等效电阻与等效电感电抗串联，得到并联部分的串联等效值如下：

$$R_{eq} = Z_2\cos\theta_p = 2.28\text{k}\Omega \times \cos(46.4°) = 1.57\text{k}\Omega$$

$$X_{L(eq)} = Z_2\sin\theta_p = 2.28\text{k}\Omega \times \sin(46.4°) = 1.65\text{k}\Omega$$

电路总电阻为

$$R_{tot} = R_1 + R_{eq} = 4.7\text{k}\Omega + 1.57\text{k}\Omega = 6.27\text{k}\Omega$$

电路总电抗为

$$X_{L(tot)} = X_{L1} + X_{L(eq)} = 7.85\text{k}\Omega + 1.65\text{k}\Omega = 9.50\text{k}\Omega$$

电路总阻抗为

$$Z_{tot} = \sqrt{R_{tot}^2 + X_{L(tot)}^2} = \sqrt{(6.27\text{k}\Omega)^2 + (9.50\text{k}\Omega)^2} = 11.4\text{k}\Omega$$

(b) 应用欧姆定律求总电流

$$I_{tot}=\frac{V_S}{Z_{tot}}=\frac{10V}{11.4k\Omega}=877\mu A$$

(c) 为求相位角，将电路视为R_{tot}和$X_{L(tot)}$的串联组合，I_{tot}滞后于V_S的相位角为

$$\theta=\arctan\left(\frac{X_{L(tot)}}{R_{tot}}\right)=\arctan\left(\frac{9.50k\Omega}{6.27k\Omega}\right)=56.6°$$

相关问题：(a) 求图12-28中电路串联部分两端的电压。

(b) 求电路并联部分两端的电压。

Multisim仿真

打开Multisim仿真文件E12-12，测量流过每个元件的电流，测量Z_1和Z_2两端的电压。

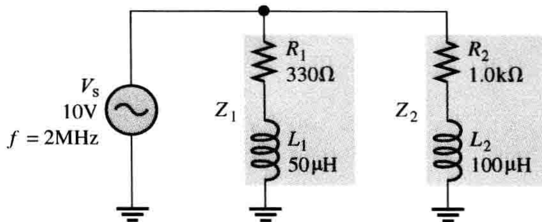


图 12-29

【例12-13】 求图12-29中每个元件两端的电压，画出电流和电压的相量图。

解： 首先计算X_{L1}和X_{L2}。

$$X_{L1}=2\pi fL_1=2\pi\times 2MHz\times 5\mu H=628\Omega$$

$$X_{L2}=2\pi fL_2=2\pi\times 2MHz\times 100\mu H=1.26k\Omega$$

现在求每个支路的阻抗。

$$Z_1=\sqrt{R_1^2+X_{L1}^2}=\sqrt{(330\Omega)^2+(628\Omega)^2}=709\Omega$$

$$Z_2=\sqrt{R_2^2+X_{L2}^2}=\sqrt{(1.0k\Omega)^2+(1.26k\Omega)^2}=1.61k\Omega$$

计算每条支路的电流。

$$I_1=\frac{V_S}{Z_1}=\frac{10V}{709\Omega}=14.1mA$$

$$I_2=\frac{V_S}{Z_2}=\frac{10V}{1.61k\Omega}=6.21mA$$

现在应用欧姆定律求各个元件两端的电压。

$$V_{R1}=I_1R_1=14.1mA\times 330\Omega=4.65V$$

$$V_{L1}=I_1X_{L1}=14.1mA\times 628\Omega=8.85V$$

$$V_{R2}=I_2R_2=6.21mA\times 1.0k\Omega=6.21V$$

$$V_{L2}=I_2X_{L2}=6.21mA\times 1.26k\Omega=7.82V$$

现在求与各支路电流相关的相位角的值。

$$\theta_1=\arctan\left(\frac{X_{L1}}{R_1}\right)=\arctan\left(\frac{628\Omega}{330\Omega}\right)=62.3°$$

$$\theta_2=\arctan\left(\frac{X_{L2}}{R_2}\right)=\arctan\left(\frac{1.26k\Omega}{1.0k\Omega}\right)=51.6°$$

因此I_1滞后于V_S62.3°，I_2滞后于V_S51.6°，如图12-30a所示。

电压的相位关系确定如下：

- V_{R1}与I_1同相位，因此滞后于V_S62.3°。
- V_{L1}超前于$I_1$90°，所以它的角度是90°−62.3°=27.7°。
- V_{R2}与I_2同相位，因此滞后于V_S51.6°。
- V_{L2}超前于$I_2$90°，所以它的角度是90°−51.6°=38.4°。

这些相位关系如图12-30b所示。

相关问题：试问在图12-30中频率升高对总电流有什么影响？

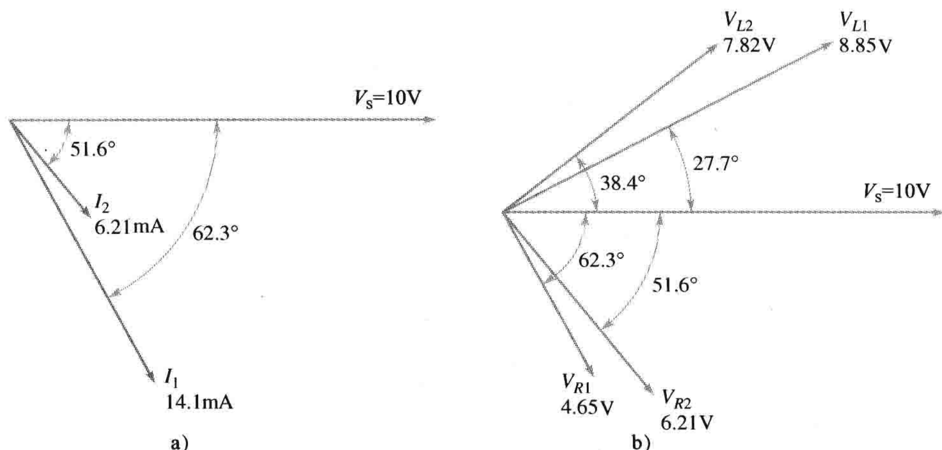


图　12-30

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E12-13，测量每个元件两端的电压并与计算值比较。

本节测试题

1. 求图 12-29 中电路的总电流。
提示：先求 I_1和 I_2水平分量的和及 I_1和 I_2垂直分量的和，再利用勾股定理得 I_{tot}。
2. 试问图 12-29 中电路的总阻抗是多少？

12.7　*RL* 电路的功率

在纯电阻交流电路中，电源提供的所有能量都被电阻以热的形式消耗掉。而在纯电感交流电路中，电压周期的一部分电源提供的所有能量都被电感以磁场形式存储起来，周期的另一部分电感又将存储的能量全部返还给电源，没有净能量转换为热。当电路中同时存在电阻和电感时，部分能量由电感交替地存储和返还，另一部分则被电阻消耗掉。转换为热的能量多少由电阻和电感电抗的相对值决定。

学习完本节内容，应该能够

- 确定 *RL* 电路的功率；
- 说明有功功率和无功功率；
- 画出功率三角形；
- 定义功率因数；
- 说明功率因数的校正。

当串联 *RL* 电路的电阻大于电感电抗时，电源提供的总能量中被电阻消耗的部分多于电感存储和返还的部分，而当电抗大于电阻时，电感存储与返还的能量多于转换为热的能量。

我们知道，电阻消耗的功率称为有功功率，电感的功率是无功功率，可表示为

$$P_r = I^2 X_L \tag{12-17}$$

串联 *RL* 电路的通用功率三角形如图 12-31 所示，视在功率 P_a是有功功率 P_{true}和无功功率 P_r的合成。

【例 12-14】　求图 12-32 中的功率因数、有功功率、无功功率和视在功率。

解： 电路的阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(1.0\text{k}\Omega)^2 + (2.0\text{k}\Omega)^2} = 2.24\text{k}\Omega$$

电流为

$$I = \frac{V_S}{Z} = \frac{10\text{V}}{2.24\text{k}\Omega} = 4.46\text{mA}$$

相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{2.0\text{k}\Omega}{1.0\text{k}\Omega}\right) = 63.4°$$

由公式（10-28）定义的功率因数为

$$PF = \cos\theta = \cos(63.4°) = 0.448$$

有功功率为

$$P_{\text{true}} = V_S I\cos\theta = 10\text{V} \times 4.46\text{mA} \times 0.448 = 20\text{mW}$$

无功功率为

$$P_r = I^2 X_L = (4.46\text{mA})^2 \times 2.0\text{k}\Omega = 39.8\text{mVAR}$$

视在功率为

$$P_a = I^2 Z = (4.46\text{mA})^2 \times 2.24\text{k}\Omega = 44.6\text{mVA}$$

相关问题：如果图 12-32 中的频率升高，试问 P_{true}、P_r和 P_a会如何变化？

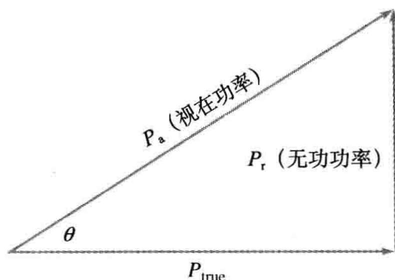


图 12-31 RL 电路的通用功率三角形

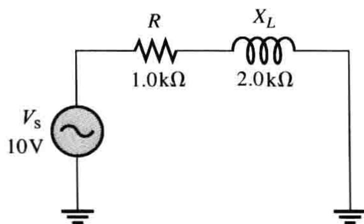
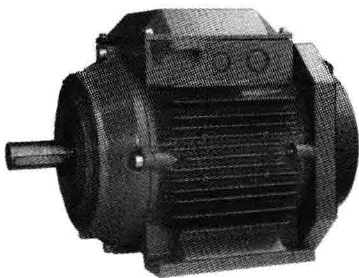


图 12-32

功率因数的意义

回顾功率因数等于 θ 的余弦（$PF = \cos\theta$），当电源电压与总电流之间的相位角增大时，功率因数减小，表明越来越趋于无功电路。功率因数越小表明有功功率越小而无功功率越大，由于电感性负载的电流滞后于电源电压，所以其功率因数称为滞后功率因数。

与第 10 章一样，功率因数对确定有多少有用功率（有功功率）传输给负载非常重要。最高的功率因数为 1，表示所有流向负载的电流都与电压同相位（电阻性）；当功率因数为 0 时，所有流向负载的电流与电压相位差 90°（电抗性）。



图片转载自 yukosourov/Fotolia. com

系统注释：电动机相移

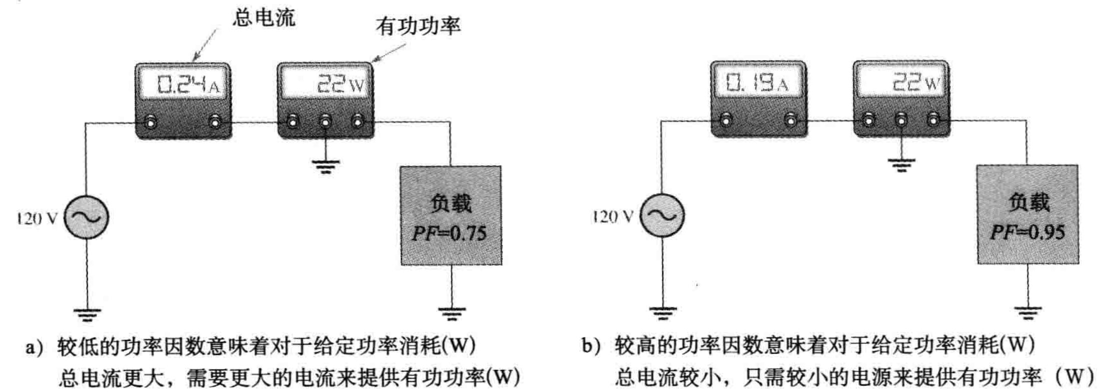
工业用大型交流感应电动机在起动时的短暂时间电流会达到最大额定电流的 5 至 6 倍，起动阻抗是纯电抗性的，意味着起动时电流滞后于端电压 90°，功率因数为 0。当电动机加速完成后，电流降到额定值（或以下），负载更似电阻性，因此相移减小，功率因数增大趋于 1。大多数大型感应电动机使用电机起动器，在起动时插入串联限流电阻，以降低非常高的起动电流。

一般情况下，希望功率因数尽可能接近 1，这样电源传输给负载的大部分功率都是有用的或有功功率。有功功率只有一个传输方式，从电源向负载传输，在负载中能量消耗并做功；而无功功率则只是简单地在电源和负载之间来回穿梭，不做净功，能量只有在做功时才被使用。

由于其特定的功能，许多实际负载均含有电感，这是正常工作所必需的，例如变压器、电

动机、扬声器，因此，必须重点考虑电感性（或电容性）负载。

为了看清功率因数对系统需求的影响，可参考图 12-33。该图表示了电感与电阻并联组成的典型电感性负载。图 12-33a 的负载功率因数相对较低（0.75），图 12-33b 的功率因数相对较高（0.95）。虽然两个负载消耗的有功功率相同，如瓦特表所示，但是，图 12-33a 的低功率因数负载从电源吸取的电流比图 12-33b 的高功率因数负载从电源吸取的电流要大，如电流表所示。因此，图 12-33a 的电源必须比图 12-33b 的电源有更大的 VA 值，连接负载与电源的导线也必须比图 12-33b 的粗，在长距离传输时这是一个很重要的条件，例如电力输送。



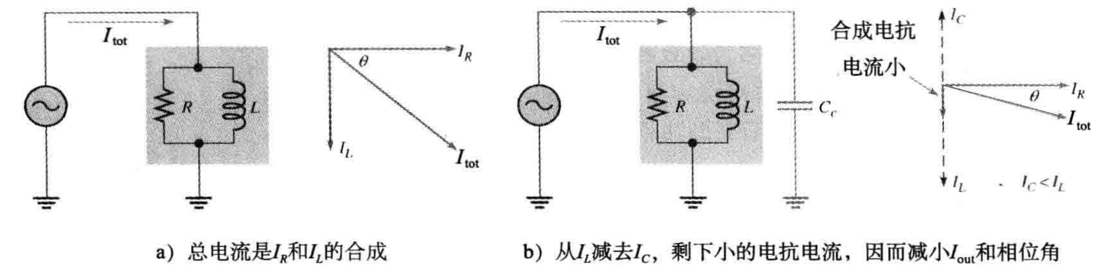
a) 较低的功率因数意味着对于给定功率消耗(W)总电流更大，需要更大的电流来提供有功功率(W)

b) 较高的功率因数意味着对于给定功率消耗(W)总电流较小，只需较小的电源来提供有功功率（W）

图 12-33 功率因数对系统需求如电源额定值（V·A）和导体尺寸的影响演示，虽然负载不同但它们消耗的有功功率相同

图 12-33 演示了高功率因数在向负载高效传输功率上的优点。另外，电力公司是按照视在功率计费，所以高功率因数也更便宜。

功率因数校正 电感性负载的功率因数可以通过并联电容来提高，如图 12-34 所示。电容产生一个与电感电流相位差 180°的电流分量，对总电流的相位滞后进行补偿，这个抵消效应降低了总电流的相位角，使功率因数得到提高。



a) 总电流是I_R和I_L的合成

b) 从I_L减去I_C，剩下小的电抗电流，因而减小I_{out}和相位角

图 12-34 通过添加补偿电容（C_c）提高功率因数举例。当 θ 减小时，PF 增大

在工业环境中，常见三相电动机、电弧焊机及类似的负载，往往都是电感性负载，每相电流都滞后于电压。根据每相的有功功率和视在功率分量，图 12-31 所示的通用功率三角形可以应用到三相电路。理想情况下，每一相的电流波形应跟踪电压波形（这意味着 $PF=1$），并且各相的功率必须相同（称为负载平衡）。使用均衡负载时，可在每条火线连接一个补偿电容，像单相情况那样，进行电容校正。

在某些情况下一相负载不平衡，不同的负载可能会引起电流波形的失真。失真由非线性负载如开关电源引起，间歇性负载（如电焊机）也可能改变所需的功率因数校正。这些情况需要更复杂的解决方案，不是仅仅在每条火线接补偿电容器，有源电路是一种相位角可以改变的电路。

本节测试题

1. 试问 RL 电路中哪个元件消耗功率？
2. 计算 $\theta=50°$时的功率因数。
3. 某串联 RL 电路由 470Ω 电阻和工作频率下 620Ω 电感电抗构成，求 $I=100\text{mA}$ 时的 P_{true}、P_r 和 P_a。

12.8 RL 滤波器

与 RC 电路一样，串联 RL 电路也表现出频率选择特性。基本频率选择（滤波）电路是 RL 电路的一个应用。

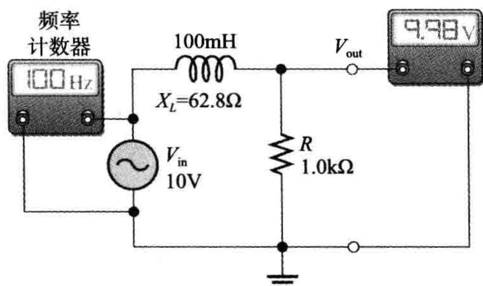
学习完本节内容，应该能够

- 讨论 RL 电路作为滤波器如何工作。

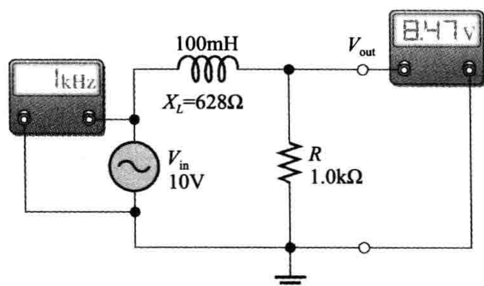
12.8.1 低通特性

我们已经在串联 RC 滞后电路中知道相位角与输出电压随频率的变化，串联 RL 电路作为滤波器，重点是输出电压的幅度随频率的变化。

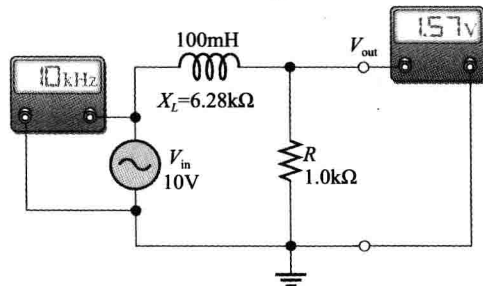
利用频率从 100Hz～20kHz 作步进升高的系列测量，图 12-35 显示了串联 RL 电路的滤波作用，在每个频率点测量一次输出电压。我们看到，当整个过程输入电压保持在恒定 10V 时，随着频率的升高，电感电抗变大，使得电阻两端的电压下降。对于这些特定测量值的频率响应曲线与图 10-47 中的低通 RC 电路类似。



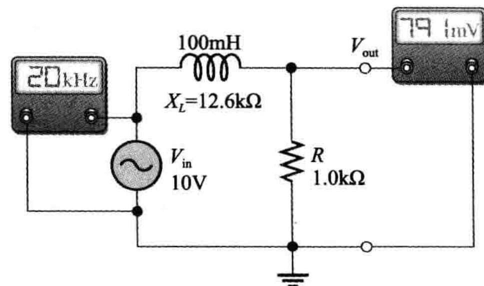
a) $f=100\text{ Hz}, X_L=62.8\ \Omega, V_{out}=9.98\text{ V}$



b) $f=1\text{ kHz}, X_L=628\ \Omega, V_{out}=8.47\text{ V}$



c) $f=10\text{ kHz}, X_L=6.28\text{ k}\Omega, V_{out}=1.57\text{ V}$



d) $f=20\text{ kHz}, X_L=12.6\text{ k}\Omega, V_{out}=791\text{ mV}$

图 12-35 低通滤波举例。忽略线圈电阻，随着输入频率的升高输出电压减小

12.8.2 高通特性

为了说明 RL 高通滤波的作用，图 12-36 显示了一个系列测量。频率从 10Hz 开始，步进

升高至10kHz。我们知道，随着频率的升高，电感电抗增大，使得更多电压降在电感两端，把这些测量值描绘出来，得到的响应曲线与图10-49所示的RC高通电路相似。

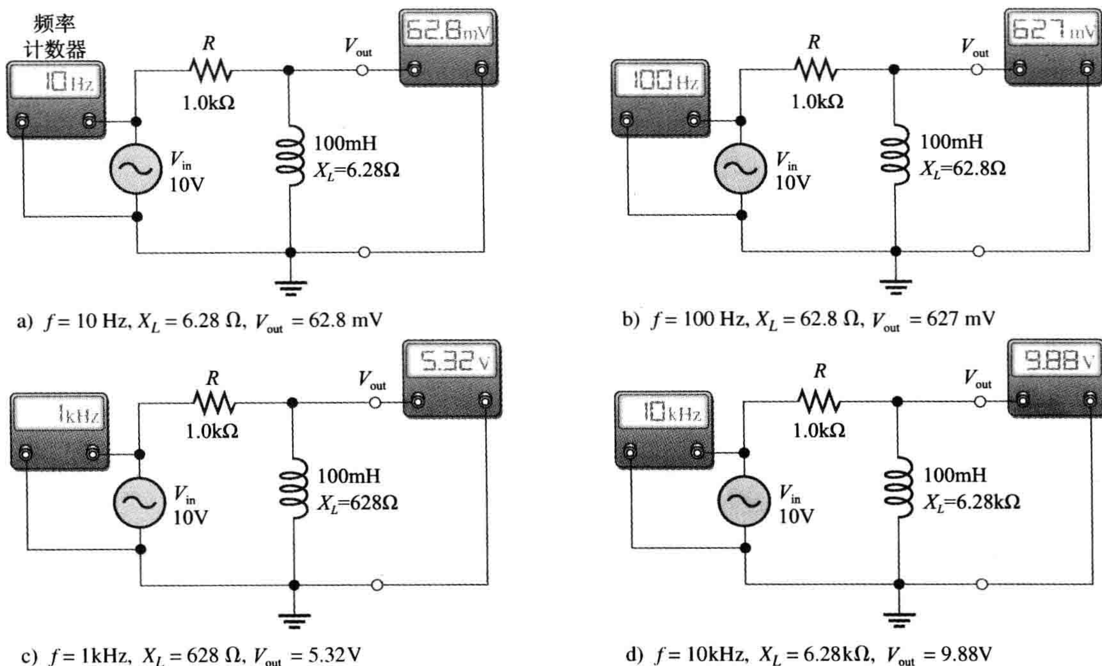


图12-36 高通滤波举例。忽略线圈电阻，随着输入频率的升高输出电压增大

12.8.3 RL滤波器的截止频率

低通或高通RL滤波器中电感电抗等于电阻的频率称为截止频率，记为f_c。这一条件可表示为$2\pi f_c L=R$，解出f_c得到下面的公式：

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} \tag{12-18}$$

与RC滤波器一样，在频率f_c时输出电压是其最大值的70.7%。在高通电路中，所有高于f_c的频率认为能够通过，而所有低于f_c的频率均被阻断。当然在低通电路中通断关系要反过来。第10章定义的带宽既适用于RC串联电路也适用于RL串联电路。

【例12-15】 计算图12-37中滤波器的截止频率，试问这是高通滤波器还是低通滤波器？

解： 对于图12-37a，截止频率为

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} = \frac{1.0\text{k}\Omega}{2\pi \times 40\mu\text{H}} = 3.98\text{MHz}$$

这是一个高通滤波器。

对于图12-37b，截止频率为

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} = \frac{680\Omega}{2\pi \times 220\mu\text{H}} = 492\text{kHz}$$

这是一个低通滤波器。

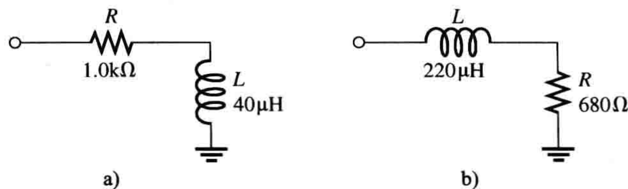


图 12-37

相关问题：若要通过改变电阻将高通滤波器的截止频率改成10MHz，试问电阻值将指定为多少？

系统举例 12-1　电磁干扰（EMI）滤波器

电感的一个重要应用是构造滤波器，选择特定频率并抑制其他频率。电子工程师面临的一个普遍问题是称为电磁干扰（EMI）的传导或辐射干扰，这种干扰会对其他电路和系统造成问题。许多系统中电源输入都含有电磁干扰（EMI）输入滤波器，以减少通过共用电源导致的来自其他电路潜在的干扰。

电磁干扰滤波器的设计从特性问题开始，包括干扰的谐波含量、噪声的类型以及路径（传导性或辐射性）。干扰可以是任何频率的，但通常在射频域。电磁干扰滤波器的设计可能相当复杂，这取决于被保护电路的灵敏度和特定的干扰，经常需要用计算机作辅助设计。

图 12-38 显示了一个实际的为直流-直流转换器设计的电磁干扰电路，其他电磁干扰滤波器可能与这个电路看起来完全不同，但目的都是降低干扰。

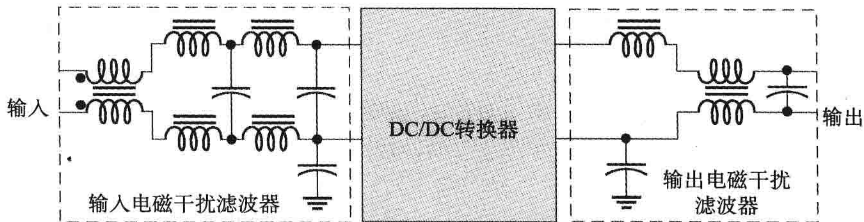


图 12-38　电磁干扰滤波器

虽然电磁干扰滤波器设计不是本课程的范围，但这也说明了电感在复杂滤波器中的应用。本节中所介绍的滤波器是基本 *RL* 滤波器，是比这个系统举例的复杂电磁干扰滤波器简单的频率选择电路。图 12-39 给出了一个基本滤波器（不严格限定 *RL* 或 *RC*），这是一个分频网络，将高频导向一个扬声器（“高音”），低频导向另一个扬声器（“低音”）。虽然扬声器本身是复杂的阻抗，但电感使低频分量能通过到低音而衰减高频，电容使高频能通过到高音喇叭而衰减低频。

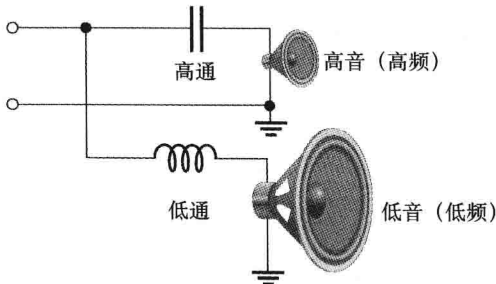


图 12-39　分频网络

本节测试题

1. 为了得到串联 *RL* 电路的低通特性，应该从哪个元件输出？
2. 什么是 EMI？
3. 电磁干扰滤波器的目的是什么？

12.9　故障排除

元件故障通常会对基本 *RL* 电路的频率响应产生影响。

学习完本节内容，应该能够

- 对 *RL* 电路进行故障排除；
- 查找开路电感；
- 查找开路电阻；
- 查找并联电路的开路。

开路电感的影响　电感最常见的故障模式是绕组开路，可能原因是电流过大或机械接触故障。出于这个原因，电感往往封装起来以避免连接故障。线圈开路对基本串联 *RL* 电路工作的影响很容易看出来，如图 12-40 所示。很显然，由于不存在电流路径，所以电阻上的电压为

零，总电源电压全部降在开路的电感两端。

开路电阻的影响 当电阻开路时，电路中没有电流，所以电感电压为零，总输入电压全部降在开路的电阻两端，如图 12-41 所示。

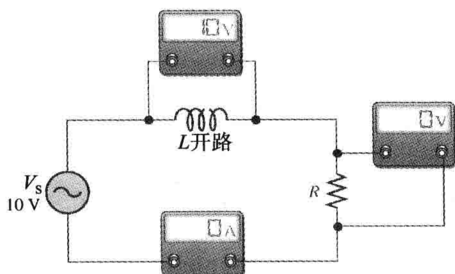


图 12-40 开路线圈的影响

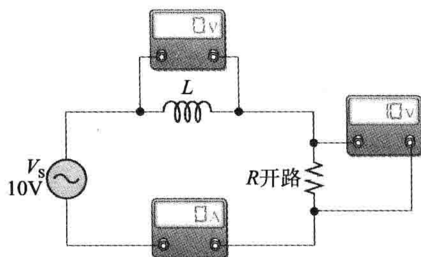
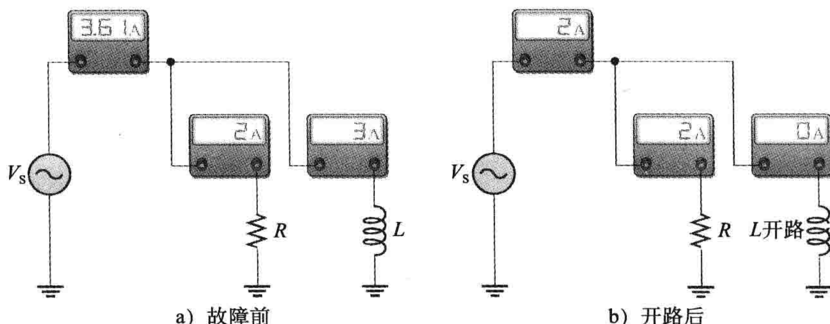


图 12-41 开路电阻的影响

并联电路中的开路元件 在并联 RL 电路中，开路的电感或电阻将使总阻抗增大，从而导致总电流减小。显然，开路元件支路的电流为零，如图 12-43 所示。



a）故障前 b）开路后

图 12-42 V_S恒定的并联电路中开路元件的影响

短路线圈对电感的影响 虽然很少发生，但有可能由于绝缘损坏导致一些绕组线圈被短路在一起。这个故障模式不比线圈开路。足够数量的绕组短路可能会导致电感减小，因为电感与线圈匝数的平方成正比。

其他故障排除考虑

正常工作的电路出现故障不一定都是由于元件故障。导线松脱、接触损坏、坏的焊点等都可能导致电路出现开路。线头或焊渣则可能引起短路。电路中错误的元件值（例如不正确的电阻值）、函数发生器频率设置错误或电路输出连接错误也可能造成电路工作不正常。

通常总先检查仪器及电源插头是否连接正常，然后查看明显的故障，如破损或松动的接触、连接器未完全插入、是否有线头或焊渣造成部分短路等。

本节测试题

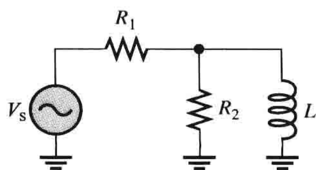


图 12-43

1. 为什么电感常常封装起来？
2. 说明有线圈短路的电感对串联 RL 电路的影响。
3. 在图 12-43 的电路中，指出当 L 开路时 I_{tot}、V_{R1}和 V_{R2}是增大还是减小。

本章小结

- 当正弦电压加到 *RL* 电路时，所有的电流和电压降都同样是正弦波。
- *RL* 电路的总电流总是滞后于电源电压。
- 电阻电压总是与电流同相位。
- 理想电感的电压总是超前于电流 90°。
- *RL* 滞后电路的输出电压在相位上滞后于输入电压。
- *RL* 超前电路的输出电压在相位上超前于输入电压。
- *RL* 电路的阻抗由电阻和电感电抗组合决定。
- 阻抗以欧姆为单位表示。
- *RL* 电路的阻抗随频率正向变化。
- 串联 *RL* 电路的相位角（θ）随频率正向变化。
- 测量电源电压和总电流，然后应用欧姆定律可以确定电路的阻抗。
- *RL* 电路中，一部分功率是电阻性的，另一部分是电抗性的。
- 有功功率（真实功率）和无功功率的相量组合称为视在功率。
- 功率因数表示视在功率中有多少是有功功率。
- 功率因数为 1 表示纯电阻电路，功率因数为 0 表示纯电抗电路。
- 在表现频率选择性的电路中，某些频率通过到输出，而其他频率则被抑制。

关键术语

电感电纳（Inductive susceptance，B_L） 电感电抗的倒数，单位是西门子。

***RL* 滞后电路（*RL* lag circuit）** 一种移相电路，取自电阻的输出电压滞后于输入电压一个特定角度。

***RL* 超前电路（*RL* leadcircuit）** 一种移相电路，取自电感的输出电压超前于输入电压一个特定角度。

关键公式

公式	说明
(12-1) $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$	串联 *RL* 的阻抗
(12-2) $\theta = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right)$	串联 *RL* 的相位角
(12-3) $V_S = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$	串联 *RL* 电路的总电压
(12-4) $\theta = \arctan\left(\frac{V_L}{V_R}\right)$	串联 *RL* 的相位角
(12-5) $\phi = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right)$	*RL* 滞后电路的相位角
(12-6) $V_{out} = \left(\frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{in}$	*RL* 滞后电路的输出电压
(12-7) $\phi = 90° - \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right)$	*RL* 超前电路的相位角
(12-8) $V_{out} = \left(\frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}\right)V_{in}$	*RL* 超前电路的输出电压
(12-9) $Z = \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$	并联 *RL* 的阻抗
(12-10) $\theta = \arctan\left(\frac{R}{X_L}\right)$	并联 *RL* 的相位角
(12-11) $G = \frac{1}{R}$	电导
(12-12) $B_L = \frac{1}{X_L}$	电感电纳
(12-13) $Y = \frac{1}{Z}$	导纳

(12-14) $Y_{tot}=\sqrt{G^2+B_L^2}$ 总导纳

(12-15) $I_{tot}=\sqrt{I_R^2+I_L^2}$ 并联RL电路的总电流

(12-16) $\theta=\arctan\left(\frac{I_L}{I_R}\right)$ 并联RL电路的相位角

(12-17) $P_r=I^2X_L$ 无功功率

(12-18) $f_c=\frac{R}{2\pi L}$ RL滤波器的截止频率

是非测验题

1. $R=X_L$的交流电路相位角为45°。
2. 交流串联RL电路中电阻两端的电压降为3.0V，电感两端的电压降为4.0V，则电源电压为5.0V。
3. 交流串联RL电路中电感电流和电压同相位。
4. 交流并联RL电路中电感电纳总是小于导纳。
5. 交流并联RL电路中电感两端的电压与电阻两端的电压不同相位。
6. 电纳和导纳的单位都是西门子。
7. 阻抗的倒数是电纳。
8. 如果电路的功率因数为0.5，则有功功率与无功功率相等。
9. 纯电阻电路的功率因数为0。
10. 高通串联RL滤波器的输出取自电阻两端。

自测题

1. 串联RL电路的电阻电压
   (a) 超前于电源电压
   (b) 滞后于电源电压
   (c) 与电源电压同相位
   (d) 与电流同相位
   (e) (a) 和 (d)
   (f) (b) 和 (d)
2. 加到串联RL电路的电压频率升高时，其阻抗
   (a) 减小 (b) 增大 (c) 不变
3. 加到串联RL电路的电压频率降低时，其相位角
   (a) 减小 (b) 增大 (c) 不变
4. 如果频率加倍而电阻减半，串联RL电路的阻抗
   (a) 加倍 (b) 减半
   (c) 保持恒定 (d) 没有数值不能确定
5. 为了减小串联RL电路的电流，频率必须
   (a) 升高 (b) 降低 (c) 恒定
6. 在串联RL电路中，测得电阻两端的电压有效值为10V，测得电感两端的电压有效值为10V，电源电压的峰值为
   (a) 14.14V (b) 28.28V
   (c) 10V (d) 20V
7. 第6题中的电压是在某个频率测得的，为了使电阻电压大于电感电压，频率须
   (a) 升高 (b) 降低
   (c) 加倍 (d) 没有影响
8. 当串联RL电路中电阻电压变得大于电感电压，则相位角
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 没有影响
9. 频率升高时，并联RL电路的阻抗
   (a) 增大 (b) 减小 (c) 保持恒定
10. 在并联RL电路中，电阻支路的电流有效值为2A，电感支路的电流有效值为2A，则总电流有效值为
    (a) 4A (b) 5.656A
    (c) 2A (d) 2.828A
11. 在示波器上观察两个波形，示波器时基（秒/格）设置为10μs，波形的半个周期占水平十个格，一个波形的正向过零点在刻度的最左边，另一个波形的正向过零点在往右三格处，则两个波形的相位差是
    (a) 18° (b) 36°
    (c) 54° (d) 180°
12. 下列功率因数中哪个表示在RL电路中转换的热能最少？
    (a) 1 (b) 0.9 (c) 0.5 (d) 0.1
13. 如果负载是纯电感性的，无功功率为10VAR，则视在功率为
    (a) 0VA (b) 10VA

（c）14.14V·A （d）3.16V·A

14. 某负载的有功功率为10W，无功功率为10var，则视在功率为
   （a）5V·A （b）20V·A
   （c）14.14V·A （d）100V·A

15. 某低通RL滤波器的截止频率为20kHz，则带宽为
   （a）20kHz （b）40kHz
   （c）0kHz （d）不确定

故障排除：征兆与原因

参考图12-44，给每一组征兆确定原因。

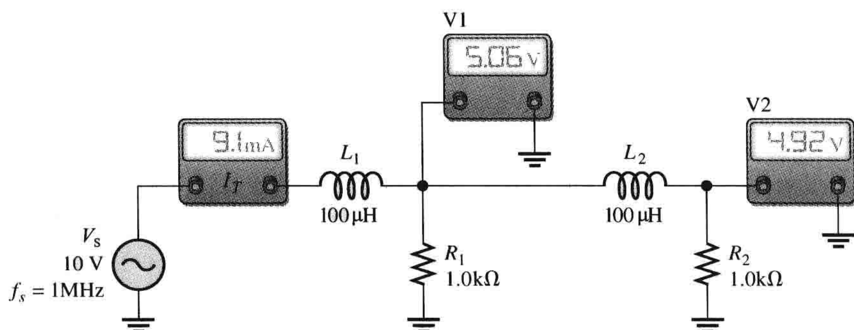


图12-44 电表指示电路的正确读数

1. 征兆：电流表读数为15.9mA，电压表1和电压表2读数都为零。
   原因：（a）L_1开路
   （b）L_2开路
   （c）R_1短路

2. 征兆：电流表读数为8.47mA，电压表1读数为8.47V，电压表2读数为0V。
   原因：（a）L_2开路
   （b）R_2开路
   （c）R_2短路

3. 征兆：电流表读数为20mA，两个电压表读数都为10V。
   原因：（a）L_1短路
   （b）R_1开路
   （c）电源频率错误，设置得非常低

4. 征兆：电流表读数为4.55mA，电压表1读数为2.53V，电压表2读数为2.15V。
   原因：（a）电源频率错误设置在500kHz
   （b）电源电压错误设置在5V
   （c）电源频率错误设置在2MHz

5. 征兆：所有电表读数都为零。
   原因：（a）电压源故障或断电
   （b）L_1开路
   （c）（a）或（b）

习题

基本习题

12.1节

1. 一个15kHz的正弦电压加到串联RL电路，求I、V_R和V_L的频率。

2. 习题1中I、V_R和V_L的波形是什么？

12.2节

3. 求图12-45中每个电路的阻抗。

4. 求图12-46中电路的阻抗和相位角。

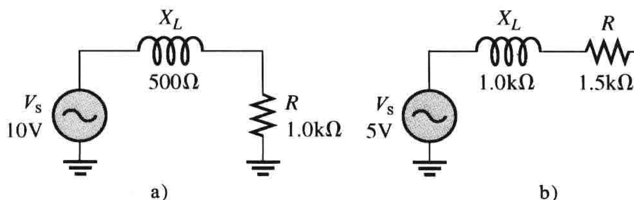


图 12-45

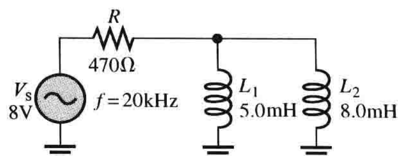


图 12-46

5. 求图12-47中电路在下列各频率时的阻抗。
   (a) 100Hz (b) 500Hz
   (c) 1kHz (d) 2kHz

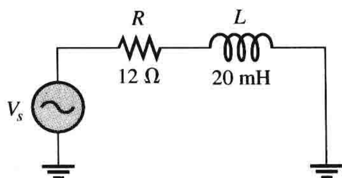


图 12-47

6. 对下列阻抗值和相位角，求串联 *RL* 电路的 *R* 和 X_L。
   (a) $Z=20\Omega$，$\theta=45°$
   (b) $Z=500\Omega$，$\theta=35°$
   (c) $Z=2.5\text{k}\Omega$，$\theta=72.5°$
   (d) $Z=998\Omega$，$\theta=45°$

12.3 节

7. 假设图12-45a的电感为796μH，试问电源频率是多少?
8. 求图12-46中总电阻和总电感两端的电压。
9. 求图12-45中各个电路的电流。
10. 计算图12-46中电路的总电流。
11. 求图12-48中电路的 θ。
12. 如果图12-48中的电感加倍，试问 θ 增大还是减小? 变化多少度?
13. 画出图12-48中 V_S、V_R 和 V_L 的波形，表明适当的相位关系。
14. 对于图12-49中的电路，在下列频率求 V_R 和 V_L。
   (a) 60Hz (b) 200Hz
   (c) 500Hz (d) 1kHz

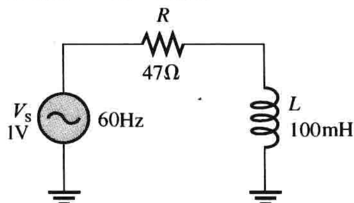


图 12-48

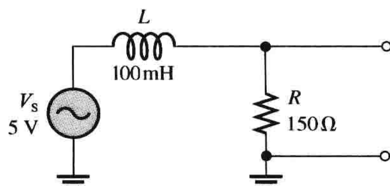


图 12-49

12.4 节

15. 试问图12-50中电路的阻抗是多少?
16. 对下列频率重复习题15：
   (a) 1.5kHz
   (b) 3kHz
   (c) 5kHz
   (d) 10kHz

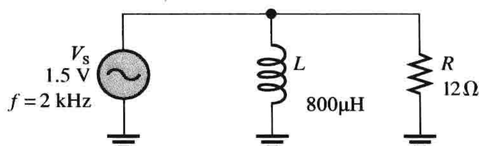


图 12-50

17. 试问图12-51中电路的导纳是多少?

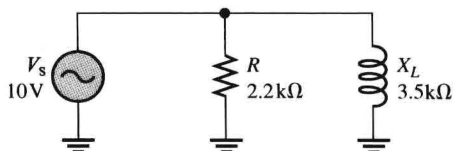


图 12-51

18. 如果频率加倍，试问图12-51中电路的导纳是多少?
19. 试问在什么频率时图12-50中 X_L 等于 *R*?

12.5 节

20. 求图12-51中的总电流及各支路电流。
21. 求图12-52中下列各量：

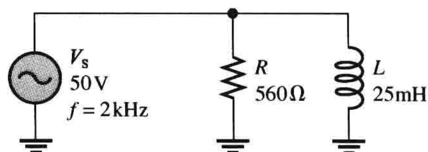


图 12-52

   (a) *Z* (b) I_R (c) I_L
   (d) I_{tot} (e) θ

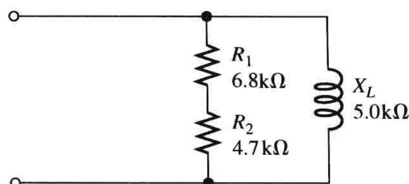


图 12-53

22. 将图 12-53 中的电路转换为等效串联形式。

12.6 节

23. 求图 12-54 中各个元件两端的电压。
24. 试问图 12-54 中的电路是倾向于电阻性还是电感性？
25. 求图 12-54 中各个支路的电流和总电流。

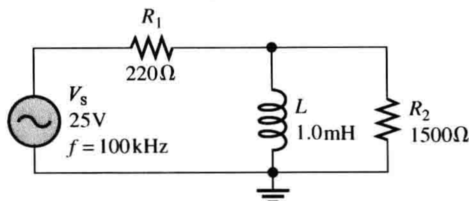


图 12-54

12.7 节

26. 某 RL 电路中，有功功率为 100mW，无功功率为 340mVAR，试问其视在功率是多少？
27. 求图 12-48 中电路的有功功率和无功功率。
28. 试问图 12-51 中电路的功率因数是多少？
29. 求图 12-54 中电路的 P_{true}、P_r、P_a 和 PF，画出功率三角形。

12.8 节

30. 画出图 12-49 中电路的频率响应曲线，表明输出电压与频率的关系，频率从 0 到 1200Hz，步进幅度 200Hz。
31. 用与习题 30 同样的方法，画出图 12-55 中电路的频率响应曲线。
32. 画出图 12-55 中的电路在频率 500Hz 时的电压相量图。

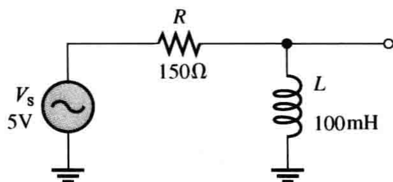


图 12-55

12.9 节

33. 如何 L_1 开路，试确定图 12-56 中各元件两端的电压。

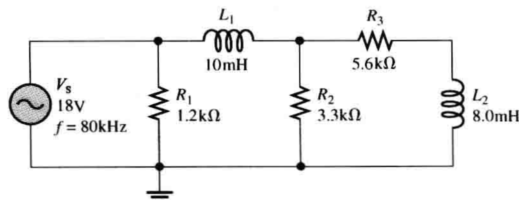


图 12-56

34. 判断图 12-57 中数字万用表的电压读数是否正确，并解释。

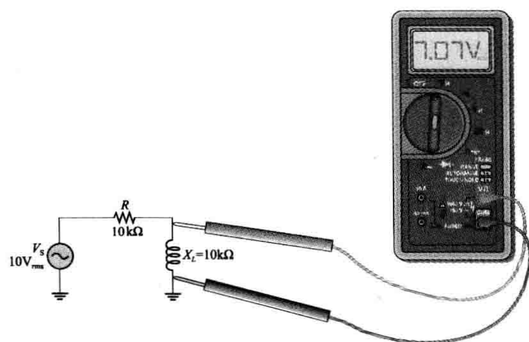


图 12-57

高级习题

35. 求图 12-58 中电感两端的电压。

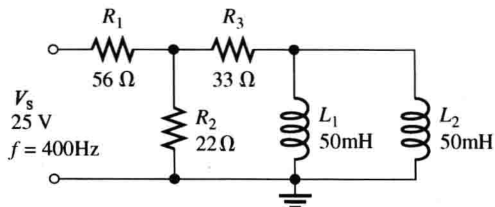


图 12-58

36. 试问图 12-58 中的电路是倾向于电阻性还是电感性？
37. 求图 12-58 中电路的总电流。
38. 对于图 12-59 中的电路，求下列各量：
    (a) Z_{tot} (b) I_{tot} (c) θ (d) V_L
    (e) V_{R3}
39. 对图 12-60 电路，求下列各量：
    (a) I_{R1} (b) I_{L1}
    (c) I_{L2} (d) I_{R2}

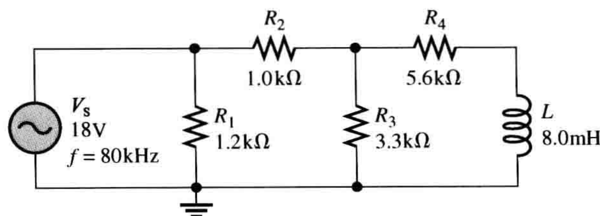


图 12-59

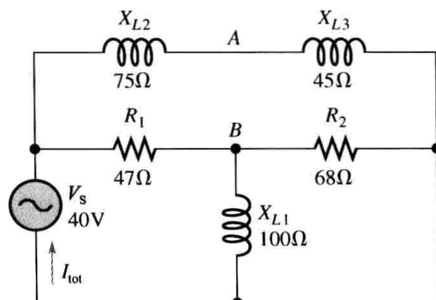


图 12-60

Multisim仿真故障排除习题

40. 打开文件P12-40，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
41. 打开文件P12-41，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
42. 打开文件P12-42，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
43. 打开文件P12-43，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
44. 打开文件P12-44，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。
45. 打开文件P12-45，确定电路是否存在故障，如果有，请识别故障。

各节测试题答案

12.1节

1. 电流频率为1kHz。
2. 当$R>X_L$时，θ靠近0°。

12.2节

1. V_S超前于I。
2. $X_L=R$
3. RL电路的电流滞后于电压，RC电路的电流超前于电压。
4. $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}=59.9\text{k}\Omega$；
   $\theta=\arctan(X_L/R)=56.6°$

12.3节

1. $V_S=\sqrt{V_R^2+V_L^2}=3.61\text{V}$
2. $\theta=\arctan(V_L/V_R)=56.3°$
3. 频率降低时，X_L增大，Z增大，θ增大。
4. $\phi=90°-\arctan(X_L/R)=81.9°$
5. $V_{out}=\left(\dfrac{R}{\sqrt{R^2+X_L^2}}\right)V_{in}=9.90\text{V}$

12.4节

1. $Z=1/Y=20\Omega$
2. $Y=\sqrt{G^2+B_L^2}=2.5\text{mS}$
3. I_{tot}滞后于V_S 32.1°

12.5节

1. $I_{tot}=V_SY=32\text{mA}$
2. $\theta=\arctan(I_L/I_R)=59.0°$；
   $I_{tot}=\sqrt{I_R^2+I_L^2}=23.3\text{mA}$
3. $\theta=90°$

12.6节

1. $I_{tot}=\sqrt{(I_1\cos\theta_1+I_2\cos\theta_2)^2+(I_1\sin\theta_1+I_2\sin\theta_2)^2}$
   $=20.2\text{mA}$
2. $Z=V_S/I_{tot}=494\Omega$

12.7节

1. 功率消耗在电阻中。
2. $PF=\cos 50°=0.643$
3. $P_{true}=I^2R=4.7\text{W}$；$P_r=I^2X_L=6.2\text{VAR}$；
   $P_a=\sqrt{P_{true}^2+P_r^2}=7.78\text{VA}$

12.8节

1. 在电阻两端输出。
2. 电磁干扰，由一个电路传导或辐射到另一个电路而引起。
3. 减小干扰。

12.9节

1. 封装有助于避免由于拉扯电感引线而造成开路。
2. 短路的绕组会减小L，从而在任意频率都减小X_L。
3. L开路时，I_{tot}减小，V_{R1}减小，V_{R2}增大。

例题中相关问题答案

例 12-1	2.04kΩ；27.8°
例 12-2	423μA
例 12-3	不能
例 12-4	12.6kΩ；85.5°
例 12-5	32°
例 12-6	有效值为 12.3V
例 12-7	65.6°
例 12-8	8.14kΩ；35.5°
例 12-9	3.70mS
例 12-10	14.0mA；71.1°
例 12-11	14.9mA
例 12-12	(a) 8.04V (b) 2.00V
例 12-13	电流减小
例 12-14	P_{true}、P_r和 P_a减小
例 12-15	2.5 kΩ

是非测验题答案

1.T 2.T 3.F 4.T 5.F 6.T 7.F 8.T 9.F 10.F

自测题答案

1.(f) 2.(b) 3.(a) 4.(d) 5.(a) 6.(d) 7.(b) 8.(b) 9.(a) 10.(d)
11.(c) 12.(d) 13.(b) 14.(c) 15.(a)

故障排除：征兆与原因的答案

1.(c) 2.(a) 3.(c) 4.(b) 5.(c)

第13章

RLC 电路与谐振

本章目标

- 确定串联 *RLC* 电路的阻抗与相位角
- 分析串联 *RLC* 电路
- 分析串联谐振电路
- 分析串联谐振滤波器
- 分析并联 *RLC* 电路
- 分析并联谐振电路
- 分析并联谐振滤波器的工作原理
- 讨论谐振电路的应用

本章学习电阻、电容和电感（*RLC*）组合电路的频率响应，讨论串联和并联 *RLC* 电路，包括串联和并联谐振的概念。

因为电路谐振是频率选择性的基础，所以电路谐振对许多电子系统来说非常重要，特别是在通信领域。例如，收音机和电视机能够选择某个特定电台传输的频率而抑制其他电台频率就是基于谐振原理。

带通滤波器和带阻滤波器的工作基于包含电感和电容的电路谐振，本章将讨论这些滤波器。这两种滤波器广泛应用在通信系统中。

13.1 串联 *RLC* 电路的阻抗与相位角

串联 *RLC* 电路含有电阻、电感和电容，由于电感电抗和电容电抗对电路相位角的影响相反，总电抗小于两个电抗中的任意一个。

学习完本节内容，应该能够

- 确定串联 *RLC* 电路的阻抗和相位角；
- 计算总电抗；
- 确定电路倾向于电感性或电容性。

串联 *RLC* 电路如图 13-1 所示，它含括电阻、电感和电容。

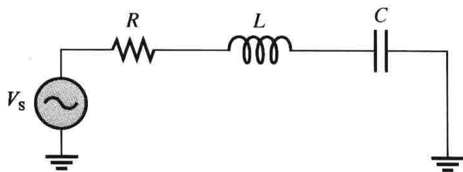


图 13-1　串联 *RLC* 电路

我们知道，电感电抗（X_L）使得总电流滞后于电源电压，而电容电抗（X_C）的作用正好相反：它使电流超前于电压。因此，X_L 和 X_C 将会相互抵消。当二者相等时，完全抵消，总电抗为零。在任何情况下，串联电路的总电抗都为

$$X_{tot} = |X_L - X_C| \tag{13-1}$$

$|X_L\text{-}X_C|$ 项表示取两个电抗之差的绝对值，即不管哪个电抗大，结果都是正值。例如 $3-7=-4$，但绝对值是

$$|3-7| = 4$$

当 $X_L > X_C$ 时，电路倾向于电感性，而当 $X_C > X_L$ 时电路则倾向于电容性。

串联 *RLC* 电路的总阻抗由下式给出

$$Z_{tot} = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2} \tag{13-2}$$

V_S 与 I 之间的相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_{tot}}{R}\right) \tag{13-3}$$

当电路为电感性时相位角为正（电流滞后于电压），而当电路为电容性时相位角为负（电流超前于电压）。

【例 13-1】 求图 13-2 中串联 *RLC* 电路的总阻抗与相位角。

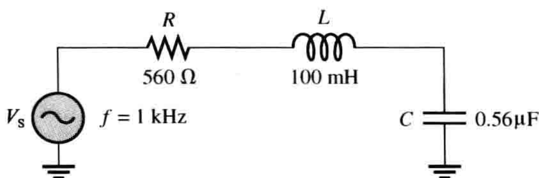


图 13-2

解： 首先求 X_C 和 X_L。

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 1\text{kHz} \times 0.56\mu\text{F}} = 284\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 1\text{kHz} \times 100\text{mH} = 628\Omega$$

本例中 $X_L > X_C$，所以电路呈电感性。总电抗大小为

$$X_{tot} = |X_L - X_C| = |628\Omega - 284\Omega| = 344\Omega \text{（电感性）}$$

电路总阻抗为

$$Z_{tot} = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2} = \sqrt{(560\Omega)^2 + (344\Omega)^2} = 657\Omega$$

相位角（I 与 V_S 之间）为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_{tot}}{R}\right) = \arctan\left(\frac{344\Omega}{560\Omega}\right) = 31.6^\circ \text{（电流滞后于 } V_S\text{）}$$

相关问题：将图 13-2 中的频率升高到 2000Hz，求 Z 和 θ。

可见，当电感电抗大于电容电抗时，电路表现为电感性，电流滞后于电源电压；当电容电抗较大时，电路将表现为电容性，电流超前于电源电压。

本节测试题

1. 说明怎样确定串联 *RLC* 电路是电感性还是电容性。
2. 给定的串联 *RLC* 电路中 X_C 为 150Ω 而 X_L 为 80Ω，试问总电抗为多少欧姆？电路是电感性还是电容性？
3. 当 R=45Ω 时求问题 2 中的电路总阻抗，试问该电路的相位角是多少？电流是超前还是滞后于电源电压？

13.2 串联 RLC 电路分析

我们已经知道电容电抗随频率反比例变化，而电感电抗随频率正比例变化，本节将讨论电抗的组合效应随频率变化的关系。

学习完本节内容，应该能够

- 分析串联 *RLC* 电路；
- 确定串联 *RLC* 电路的电流；
- 确定串联 *RLC* 电路的电压；
- 确定相位角。

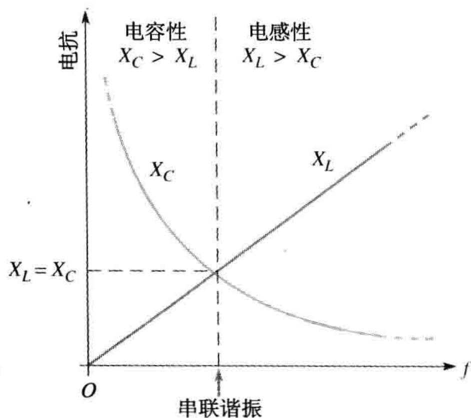


图 13-3 X_C 和 X_L 随频率变化情况

图 13-3 显示了典型串联 *RLC* 电路的总阻抗特性：从频率非常低开始，X_C 很高而 X_L 很低，随着频率的升高，X_C 减小而 X_L 增大，直至 $X_C = X_L$，两个电抗互相抵消，电路呈纯电阻性，这个状态称为**串联谐振**，我们将在 13.3 节研究。随着频率继续升高，X_L 比 X_C 大，电路呈现电感性。例 13-2 说明了阻抗和相位角随电源频率变化的情况。

X_L 的图是一条直线，而 X_C 的图则是一条曲线，如图 13-3 所示。直线的一般函数式是 y =

$mx+b$，其中 m 是直线的斜率，b 是在 y 轴的截距。公式 $X_L = 2\pi fL$ 满足直线的一般函数式，其中 $y = X_L$（变量）、$m = 2\pi L$（常数）、$x = f$（变量）、$b = 0$，这样 $X_L = 2\pi Lf + 0$。

X_C的曲线称为双曲线，双曲线的一般函数式为 $xy = k$，而电容的式子 $X_C = 1/2\pi fC$ 可以整理成 $X_C f = 1/2\pi C$，其中 $x = X_C$（变量）、$y = f$（变量）、$k = 1/2\pi C$（常数）。

【例 13-2】 对于下列各个电源频率，求图 13-4 中电路的阻抗和相位角。注意阻抗和相位角随频率的变化。

(a) $f = 1\text{kHz}$　　(b) $f = 3.5\text{kHz}$　　(c) $f = 5\text{kHz}$

解：(a) $f = 1\text{kHz}$

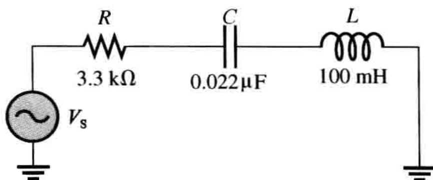


图 13-4

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 1\text{kHz} \times 0.022\mu\text{F}} = 7.23\text{k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 1\text{kHz} \times 100\text{mH} = 628\Omega$$

由于 X_C远大于 X_L，所以电路呈高电容性。总电抗大小为

$$X_{tot} = |X_L - X_C| = |628\Omega - 7.23\text{k}\Omega| = 6.6\text{k}\Omega$$

阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2} = \sqrt{(3.3\text{k}\Omega)^2 + (6.6\text{k}\Omega)^2} = 7.38\text{k}\Omega$$

相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_{tot}}{R}\right) = \arctan\left(\frac{6.6\text{k}\Omega}{3.3\text{k}\Omega}\right) = 63.4°$$

I 超前于 V_S 63.4°。

(b) $f = 3.5\text{kHz}$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 3.5\text{kHz} \times 0.022\mu\text{F}} = 2.07\text{k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 3.5\text{kHz} \times 100\text{mH} = 2.20\text{k}\Omega$$

由于 X_L稍微比 X_C大，所以电路呈趋近于纯电阻的电感性。总电抗、阻抗和相位角为

$$X_{tot} = |X_L - X_C| = |2.20\text{k}\Omega - 2.07\text{k}\Omega| = 130\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2} = \sqrt{(3.3\text{k}\Omega)^2 + (130\Omega)^2} = 3.30\text{k}\Omega$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_{tot}}{R}\right) = \arctan\left(\frac{130\Omega}{3.3\text{k}\Omega}\right) = 2.26°$$

I 滞后于 V_S 2.26°。

(c) $f = 5\text{kHz}$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 5\text{kHz} \times 0.022\mu\text{F}} = 1.45\text{k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 5\text{kHz} \times 100\text{mH} = 3.14\text{k}\Omega$$

由于 $X_L > X_C$，电路呈电感性。总电抗、阻抗和相位角为

$$X_{tot} = |X_L - X_C| = |3.14\text{k}\Omega - 1.45\text{k}\Omega| = 1.69\text{k}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2} = \sqrt{(3.3\text{k}\Omega)^2 + (1.69\text{k}\Omega)^2} = 3.71\text{k}\Omega$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{X_{tot}}{R}\right) = \arctan\left(\frac{1.69\text{k}\Omega}{3.3\text{k}\Omega}\right) = 27.1°$$

I 滞后于 V_S27.1°。

注意，随着频率的升高，电路从电容性转变成了电感性，相位状态也从电流超前转变成电流滞后。重要的是要注意到随着频率的上升，阻抗和相角降低到最小值，然后又开始增大。

相关问题：求图 13-4 中当 $f=7\text{kHz}$ 时的 Z。

串联 RLC 电路中电容电压和电感电压相位总是相差 180°，因此，V_C 和 V_L 相减，在 L 和 C 组合两端的电压总是小于两个元件中较大的那个电压，如图 13-5 所示，它们的波形如图 13-6 所示。

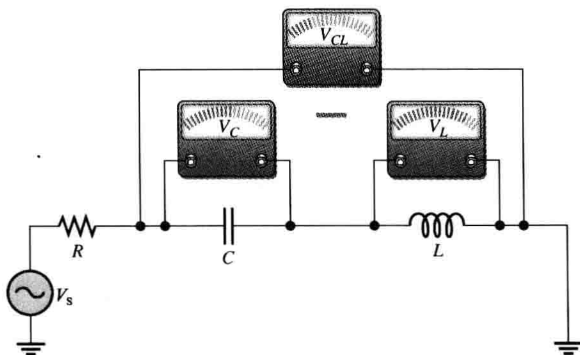


图 13-5 C 和 L 串组合两端的电压总是小于两个元件中较大的那个电压

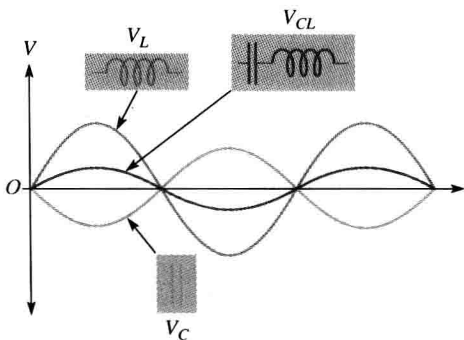


图 13-6 由于相位相反电感电压和电容电压相减

下一个例子应用欧姆定律来求串联 RLC 电路的电流和电压。

【例 13-3】 求图 13-7 中每个元件两端的电压，画出完整的电压相量图，同时求 L 和 C 组合两端的电压。

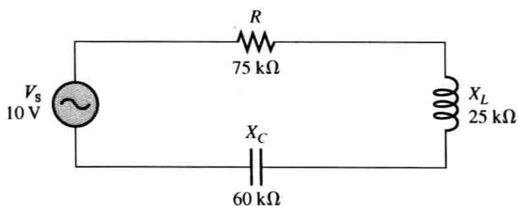


图 13-7

解：首先求总电抗。

$$X_{tot}=|X_L-X_C|=|25\text{k}\Omega-60\text{k}\Omega|$$
$$=35\text{k}\Omega$$

总阻抗为

$$Z_{tot}=\sqrt{R^2+X_{tot}^2}=\sqrt{(75\text{k}\Omega)^2+(35\text{k}\Omega)^2}$$
$$=82.8\text{k}\Omega$$

应用欧姆定律求电流。

$$I=\frac{V_s}{Z_{tot}}=\frac{10\text{V}}{82.8\text{k}\Omega}=121\mu\text{A}$$

现在应用欧姆定律，求 R、L 和 C 两端的电压。

$$V_R=IR=121\mu\text{A}\times 75\text{k}\Omega=9.08\text{V}$$
$$V_L=IX_L=121\mu\text{A}\times 25\text{k}\Omega=3.03\text{V}$$
$$V_C=IX_C=121\mu\text{A}\times 60\text{k}\Omega=7.26\text{V}$$

L 和 C 组合两端的电压为

$$V_{CL}=V_C-V_L=7.26\text{V}-3.03\text{V}=4.23\text{V}$$

电路相位角为

$$\theta=\arctan\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)=\arctan\left(\frac{35\text{k}\Omega}{75\text{k}\Omega}\right)=25°$$

由于电路呈电容性（$X_C>X_L$），所以电流超前于电源电压 25°。

相量图如图 13-8 所示，注意 V_L 超前于 V_R 90°，V_C 滞后于 V_R 90°，V_L 和 V_C 相位相差 180°。如果将电流相量表示出来，则它与 V_R 同相位。

相关问题：图 13-8 中随着电源频率的升高，电流将如何变化？

本节测试题

1. 某串联 RLC 电路的电压如下：$V_R=24\text{V}$、$V_L=15\text{V}$、$V_C=45\text{V}$，求电源电压。
2. 当 $R=10\text{k}\Omega$、$X_C=18\text{k}\Omega$、$X_L=12\text{k}\Omega$ 时，试问电流超前还是滞后于电源电压？为什么？
3. 求问题 2 的总电抗。

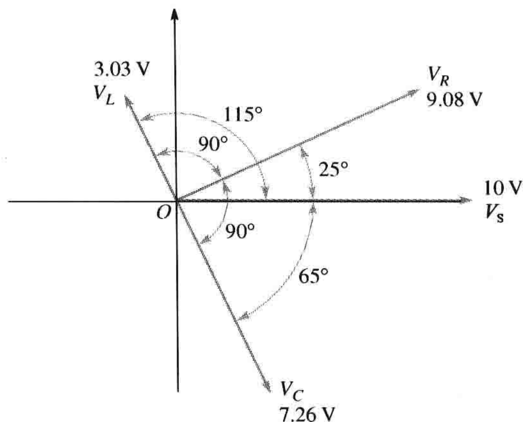


图　13-8

13.3　串联谐振

串联 RLC 电路在 $X_L=X_C$ 时发生串联谐振，谐振发生的频率称为谐振频率，记为 f_r。

学习完本节内容，应该能够

- 分析串联谐振电路；
- 定义谐振频率；
- 说明为什么谐振时电抗抵消；
- 确定串联谐振频率；
- 计算谐振时的电流与电压；
- 确定谐振阻抗。

图 13-9 演示了串联谐振状态。由于电感和电容电抗相等而互相抵消，因此阻抗为纯电阻。谐振条件表述为

$$X_L = X_C$$
$$Z_r = R$$

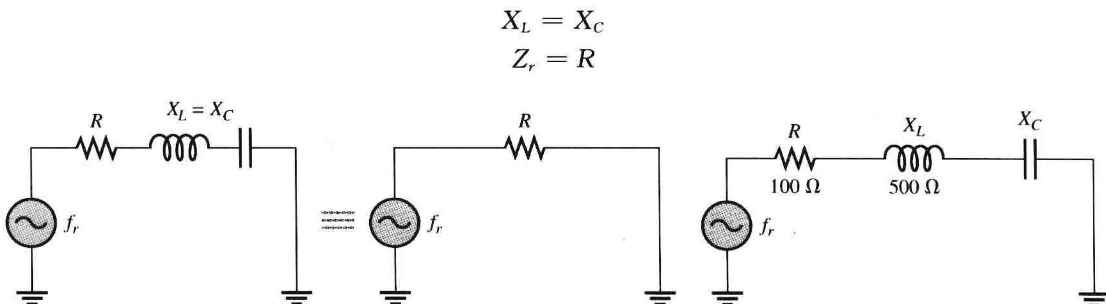


图13-9　在谐振频率（f_r）电抗大小相等且互相抵消时剩下 $Z_r=\text{R}$

图　13-10

【例 13-4】　假设图 13-10 中串联 RLC 电路谐振，求 X_C和 Z。

解：谐振时 X_L等于 X_C，因此，

$$X_C = X_L = 500\Omega$$

由于电抗互相抵消，阻抗等于电阻。

$$Z_r = R = 100\Omega$$

相关问题：试问低于谐振频率时，电路呈电感性还是电容性？

在串联谐振频率，由于电抗相等，所以 C 和 L 两端的电压大小相等，两个元件流过相同的电流，V_C和 V_L相位总是相差 180°。

在输入电压的任意周期里，C 两端电压和 L 两端电压的极性相反，如图 13-11a 和 b 所示。C 和 L 两端大小相等极性相反的电压互相抵消，从而使 A 点到 B 点的电压为零伏特，如图所示。从 A 到 B 没有电压但仍有电流，总的电抗为零，如图 13-11c 所示。图 13-11d 的电压相量图显示 V_C和 V_L幅度相同但相位相差 180°。

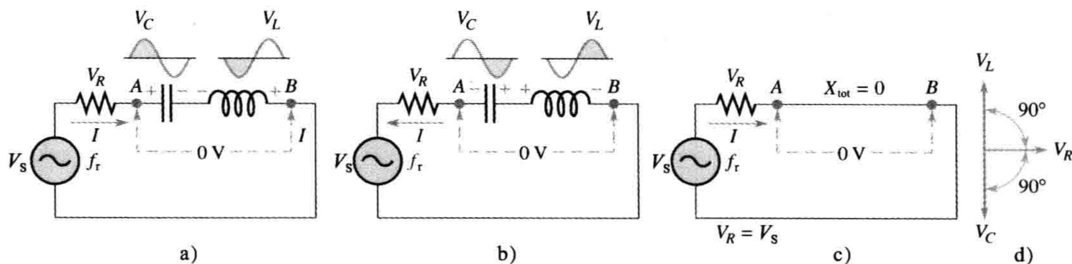


图 13-11 在谐振频率 f_r，C 和 L 两端的电压大小相等，因相位相差 180°而相互抵消，而使 CL 组合（A 点到 B 点）两端电压为 0V，电路从 A 到 B 的部分谐振时看上去像短路（忽略线圈电阻）

13.3.1 串联谐振频率

对于给定的串联 RLC 电路，仅在特定频率发生谐振。理想情况下，谐振频率的推导公式如下：

$$X_L = X_C$$

代入电抗公式，解出谐振频率（f_r）。

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

$$(2\pi f_r L)(2\pi f_r C) = 4\pi^2 f_r^2 LC = 1$$

$$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}$$

等式两边开方，得到谐振频率的公式为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{13-4}$$

【例 13-5】 求图 13-12 中电路的串联谐振频率。

解： 谐振频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{560\mu\text{H}\times 27\text{nF}}} = 40.9\text{kHz}$$

相关问题：如果图 13-12 中 $C=0.01\mu$F，试问谐振频率是多少？

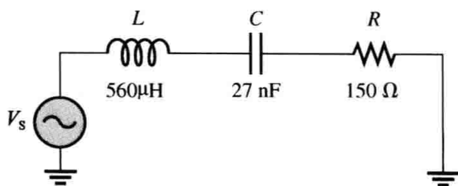


图 13-12

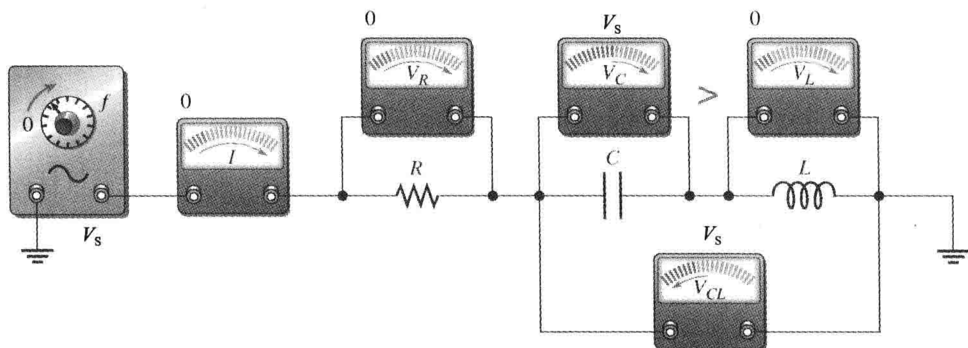
Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E13-05，通过测量确定串联谐振频率。

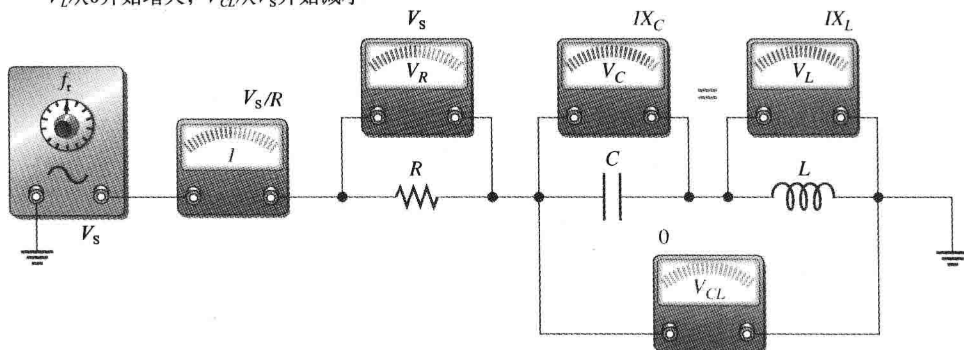
13.3.2 串联 RLC 电路的电压与电流

当频率从低于谐振频率逐步升高到谐振频率，再继续升高到高于谐振频率时，串联 RLC 电路的电压与电流的幅度跟随着变化。图 13-13 显示了根据电流与电压降的变化电路的一般响应。假设电路的 Q 值（品质因数）足够高，不会对响应产生影响，Q 值是无功功率与有功功率的比值，将在 13.4 节讨论。

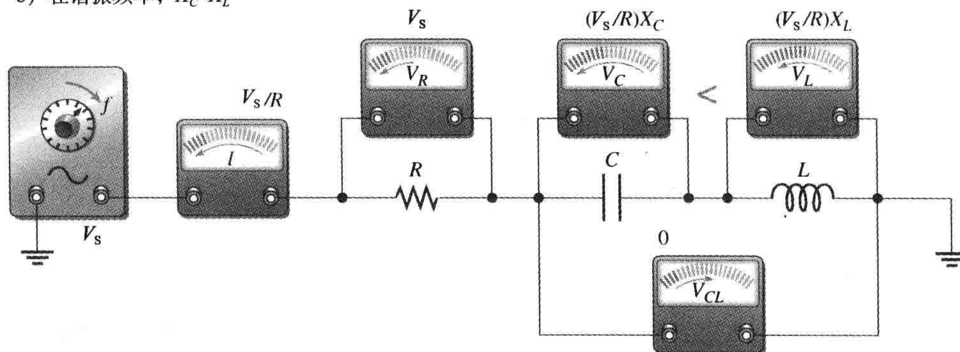
谐振频率以下 图 13-13a 表明了电源频率从零向 f_r 升高的响应。f=0Hz（直流）时，电容呈开路阻止电流，所以 R 或 L 没有电压，电源电压全部降在 C 两端。在 0Hz 时 X_C 为无穷大（C 开路），故电路阻抗也无穷大。随着频率开始升高，X_C 减小而 X_L 增大，总电抗 X_C-X_L 减小，结果阻抗减小电流增大。随着电流的增大，V_R 也增大，V_C 和 V_L 都增大。但由于 V_C 和 V_L 逐步趋于大小相同，两者的差减小，C 和 L 组合两端的电压减小。



a) 在谐振以下随着频率从0开始升高：$X_C>X_L$，I从0开始增大，V_R从0开始增大，V_C从V_S开始增大，V_L从0开始增大，V_{CL}从V_S开始减小



b) 在谐振频率，$X_C=X_L$



c) 在谐振以上随着频率升高：$X_C<X_L$，I从V_S/R开始减小，V_R从V_S开始减小，V_C从$(V_S/R)X_C$开始减小，V_L从$(V_S/R)X_L$开始增大，V_{CL}从0开始增大

图 13-13 频率从谐振以下到谐振以上逐步升高时串联RLC电路电压与电流幅度的响应（电源电压保持恒定幅度）

谐振频率 当频率达到谐振频率f_r时，如图 13-13b 所示，V_C和V_L各自都可能比电源电压大很多。因为两个电压大小相等相位相反，V_C和V_L相互抵消，从而使C和L组合两端的电压为0V。因为总电抗为零，这时总阻抗等于R，达到最小值。因此电流达到最大值V_S/R，V_R也达到最大值，等于电源电压。

谐振频率以上 当频率在谐振频率以上逐步升高时，如图 13-13c 所示，X_C继续减小而X_L继续增大，使总电抗X_L-X_C增大，结果阻抗增大电流减小。随着电流的减小，V_R也减小，V_C和V_L都减小。随着V_C和V_L减小，两者之差增大，所以V_{CL}增大。当频率非常高时，电流趋于零，V_R和V_C也趋于零，V_L趋于V_S。

图 13-14a 和图 13-14b 分别说明了频率升高时电流和电压的响应。随着频率的升高，谐振以下电流随着频率的升高而增大，在谐振频率达到峰值，在谐振频率以上电流则随着频率的升高而减小。电阻电压的响应与电流相同。

V_C和 V_L曲线的一般斜率如图 13-14c 和图 13-14d 所示。两个电压在谐振时达到最大，高于或低于 f_r时这两个电压都下降。在谐振时，C 两端和 L 两端的电压大小正好相等，但相差 180°相位，因此它们互相抵消，这样，谐振时 C 和 L 两端的电压为零因而 $V_R = V_S$，而 V_L和 V_C可能分别都比电源电压大很多。记住，不管频率是多少 V_C和 V_L极性总是相反的，但仅在谐振时大小相等。在谐振点以下 C 和 L 组合两端的电压随着频率的升高而减小，谐振时达最小值零，然后，在谐振点以上又随着频率的升高而增大，如图 13-14e 所示。

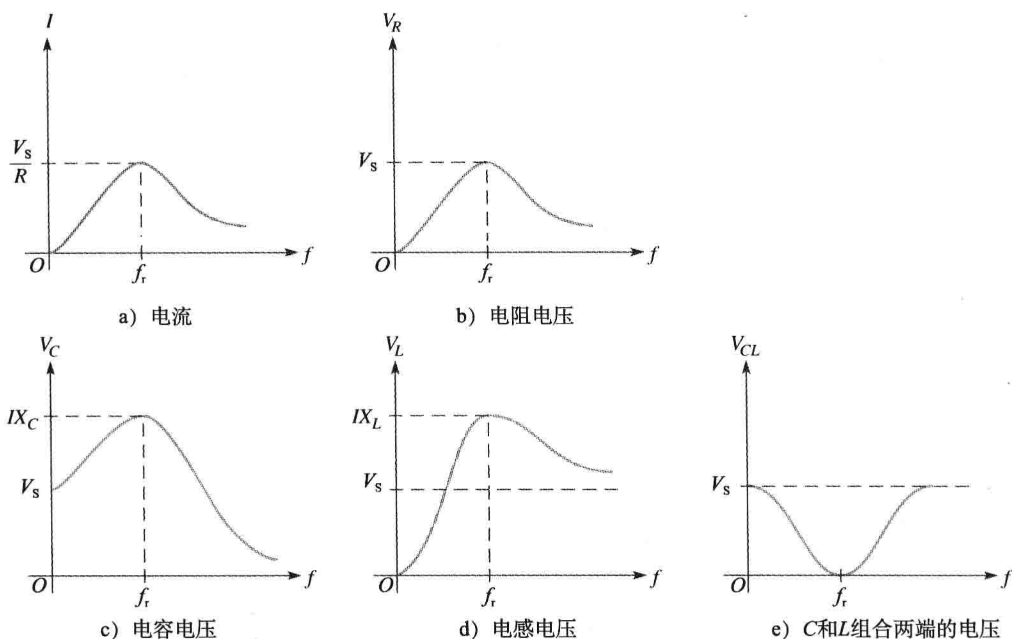


图 13-14 作为频率函数的串联 RLC 电路中一般电流和电压的幅度。谐振时 V_C和 V_L比电源电压大得多，曲线形状取决于特定电路

图 13-14 中的曲线是一般的曲线，具体曲线取决于特定的电路，曲线的形状与品质因数 Q 有关。在 Multisim 中构建电路然后利用频率特性图示仪可以画出任意电路的这些曲线。Multisim 中的频率特性图示仪是一个虚拟仪器，根据探头的位置绘制频率响应。例 13-5 中电阻两端的响应如图 13-15 所示。

系统注释 电容电感传感器

传感器广泛应用于各种系统中，用于测量某些参数，如温度、压力或其他变量。间接测量传感器电容或电感的一般方法是测量随着传感器可变的振荡器谐振频率，一个不寻常的例子是推断冲击波击碎电缆改变其电容的过程。



【例 13-6】 求图 13-16 中谐振点的 I、V_R、V_L和 V_C。

解： 在谐振点，I 最大，等于 V_S/R。

$$I = \frac{V_S}{R} = \frac{50\text{mV}}{22\Omega} = 2.27\text{mA}$$

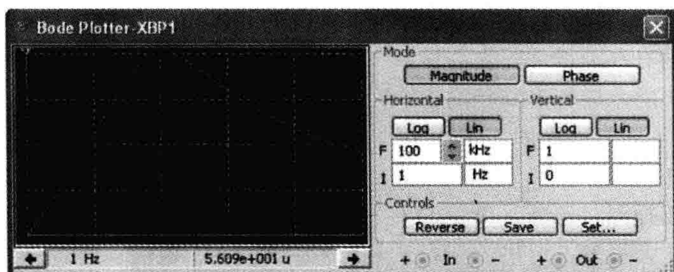


图 13-15　例 13-5 电阻两端的 Multisim 响应

应用欧姆定律求得电压。

$$V_R = IR = 2.27\text{mA} \times 22\Omega = 50\text{mV}$$
$$V_L = IX_L = 2.27\text{mA} \times 100\Omega = 227\text{mV}$$
$$V_C = IX_C = 2.27\text{mA} \times 100\Omega = 227\text{mV}$$

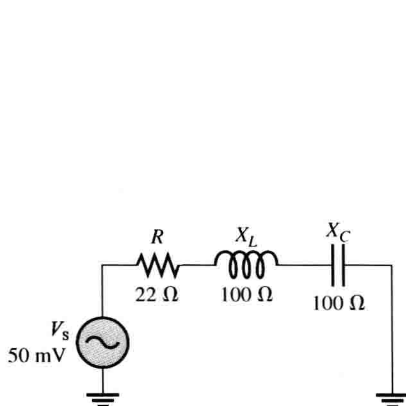


图　13-16

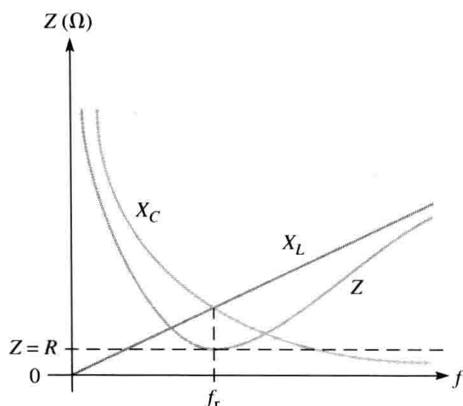


图 13-17　串联 RLC 阻抗作为频率的函数

注意，电源电压全部降在电阻两端。V_C和 V_L大小相等而相位相反，电压互相抵消，使得总电抗为零。

相关问题：在图 13-16 中，如果 $X_L = X_C = 1\text{k}\Omega$，试问谐振电流是多少？

13.3.3　串联 RLC 电路的阻抗

图 13-17 显示了阻抗对频率的一般曲线图，图中叠加了 X_C和 X_L的曲线。在零频率，由于电容表现为开路，电感表现为短路，X_C和 Z 无限大，X_L为零。随着频率的升高，X_C减小而 X_L增大。频率低于 f_r时，X_C大于 X_L，Z 随着 X_C减小。在谐振频率 f_r，$X_C = X_L$而 $Z = R$。频率高于 f_r时，X_L越来越比 X_C大，使得 Z 增大。

【例 13-7】　对图 13-18 中的电路，求下列频率时的阻抗：

(a) f_r　　　　(b) 低于 f_r 1kHz　　　　(c) 高于 f_r 1kHz

解：

(a) 在谐振频率 f_r，阻抗等于 R。

$$Z = R = 100\Omega$$

为了求频率高于和低于 f_r时的阻抗，首先计算谐振频率。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{100\text{mH}\times 0.01\mu\text{F}}} = 5.03\text{kHz}$$

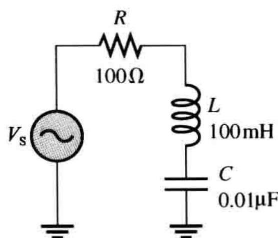


图 13-18

(b) 在低于 f_r 1kHz 时的频率及阻抗如下：

$$f = f_r - 1\text{kHz} = 5.03\text{kHz} - 1\text{kHz} = 4.03\text{kHz}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi\times 4.03\text{kHz}\times 0.01\mu\text{F}} = 3.95\text{k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi\times 4.03\text{kHz}\times 100\text{mH} = 2.53\text{k}\Omega$$

因此 $f_r - 1\text{kHz}$ 的总电抗和总阻抗为

$$X_{tot} = |X_L - X_C| = |2.53\text{k}\Omega - 3.95\text{k}\Omega| = 1.42\text{k}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2} = \sqrt{(100\Omega)^2 + (1.42\text{k}\Omega)^2} = 1.42\text{k}\Omega$$

(c) 在频率高于 f_r 1kHz 时，

$$f = f_r + 1\text{kHz} = 5.03\text{kHz} + 1\text{kHz} = 6.03\text{kHz}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi\times 6.03\text{kHz}\times 0.01\mu\text{F}} = 2.64\text{k}\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi\times 6.03\text{kHz}\times 100\text{mH} = 3.79\text{k}\Omega$$

因此 $f_r + 1\text{kHz}$ 的总电抗和总阻抗为

$$X_{tot} = |X_L - X_C| = |3.79\text{k}\Omega - 2.64\text{k}\Omega| = 1.15\text{k}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2} = \sqrt{(100\Omega)^2 + (1.15\text{k}\Omega)^2} = 1.15\text{k}\Omega$$

在 (b) 部分中，Z 为电容性；在 (c) 部分中，Z 为电感性。

相关问题：试问如果 f 减小到 4.03kHz 以下，阻抗将如何变化？在 6.03kHz 以上呢？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E13-07，在谐振频率、低于谐振频率 1kHz、高于谐振频率 1kHz 时分别测量各个元件的电流及端电压。

13.3.4 串联 *RLC* 电路的相位角

频率低于谐振频率时，$X_C > X_L$，电流超前于电源电压，如图 13-19a 所示。随着频率趋近谐振值，相位角逐步减小，到谐振点时达到 0°，如图 13-19b 所示。频率高于谐振频率时，$X_L > X_C$，电流滞后于电源电压，如图 13-19c 所示。随着频率继续升高，相位角逐步趋近 90°。相位角与频率的关系如图 13-19d 所示。

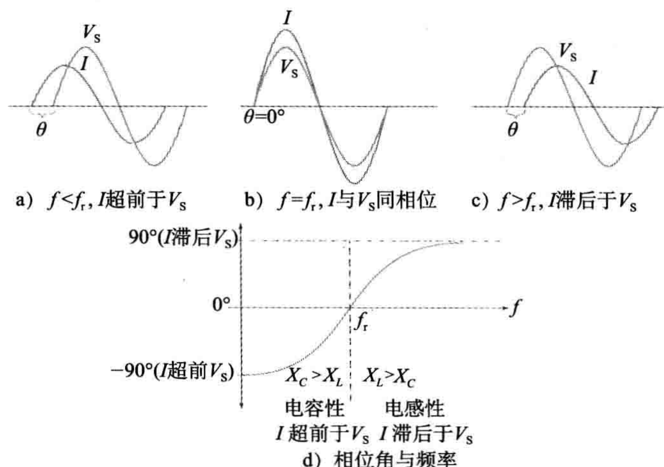


图 13-19 串联 *RLC* 电路的相位角作为频率的函数

本节测试题

1. 串联谐振的条件是什么?
2. 为什么在串联谐振频率电流为最大值?
3. 对 $C=1000\text{pF}$ 和 $L=1000\mu\text{F}$，求谐振频率。
4. 试问在 50Hz 时问题 3 中的电路是电感性、电容性还是电阻性?

13.4 串联谐振滤波器

串联 RLC 电路常用于滤波器中，本节我们将学习无源带通和带阻滤波器以及滤波器的重要特性。

学习完本节内容，应该能够

- 识别基本串联谐振带通滤波器；
- 定义并求解带宽；
- 定义半功率频率；
- 讨论分贝测量；
- 定义选择性；
- 讨论滤波器品质因数（Q）；
- 识别串联谐振带阻滤波器。

13.4.1 带通滤波器

基本串联谐振带通滤波器如图 13-20 所示。注意串联 LC 部分处于输入与输出之间，输出电压取自电阻两端。

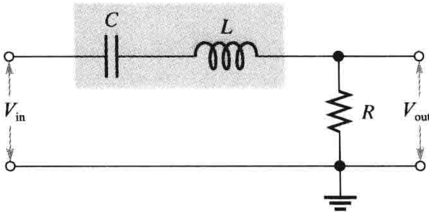
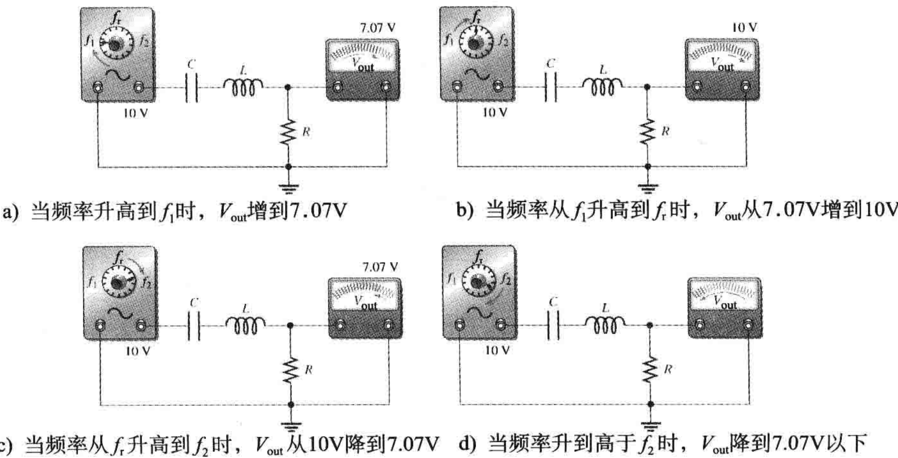


图 13-20 基本串联谐振带通滤波器

带通滤波器允许谐振频率及谐振频率附近的一定频带信号从输入端幅度没有明显减小地传输到输出端。而频率落在指定频带（称为通带）外的信号幅度降到一定电平以下，可以认为被滤波器抑制掉。

滤波作用是滤波器阻抗特性的结果。我们在 13.3 节已经学过，阻抗在谐振点最小，而低于或高于谐振频率阻抗都会越来越高，在频率非常低时，阻抗很高几乎阻止了电流，随着频率的升高，阻抗下降，通过的电流增大，电阻两端输出的电压也增大。在谐振频率，阻抗非常低，等于电路总电阻（线圈电阻加 R），这时电流最大，输出电压最大。当频率高于谐振频率时，阻抗再次增大，使电流和输出电压下降。图 13-21 演示了串联谐振带通滤波器的频率响应。



a) 当频率升高到 f_1 时，V_{out} 增到 7.07V

b) 当频率从 f_1 升高到 f_r 时，V_{out} 从 7.07V 增到 10V

c) 当频率从 f_r 升高到 f_2 时，V_{out} 从 10V 降到 7.07V

d) 当频率升到高于 f_2 时，V_{out} 降到 7.07V 以下

图 13-21 串联谐振带通滤波器频率响应举例。输入电压有效值固定在 10V 并且忽略线圈电阻

13.4.2 带通滤波器的带宽

带通滤波器的带宽（BW）是其电流等于或大于谐振频率点数值 70.7%的频率范围。图 13-22 显示了带通滤波器响应曲线上的带宽。

滤波器输出为最大值 70.7%的频率是**截止频率**。注意图 13-22 中，低于 f_r 有一个对应 I（或 V_{out}）等于谐振值（I_{max}）70.7%的频率 f_1，通常称为下截止频率；高于 f_r 也有一个对应 I（或 V_{out}）等于谐振值（I_{max}）70.7%的频率 f_2，通常称为上截止频率。关于 f_1 和 f_2 还有一些其他的名称：－3dB 频率、临界频率、带频和半功率频率（术语分贝缩写为 dB 的定义在本节稍后给出）。

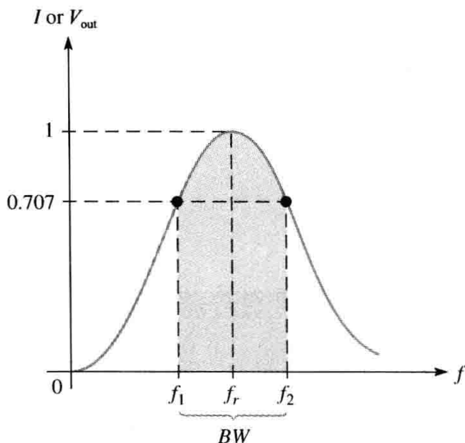


图 13-22　串联谐振带通滤波器的一般响应曲线

计算带宽的公式是

$$BW = f_2 - f_1 \tag{13-5}$$

带宽的单位是赫兹（Hz），与频率相同。

【例 13-8】　某串联谐振带通滤波器谐振时的最大电流为 100mA，试问在截止频率处的电流值是多少？

解： 截止频率时电流为最大值的 70.7%

$$I_{f1} = I_{f2} = 0.707 I_{max} = 0.707 \times 100\text{mA} = 70.7\text{mA}$$

相关问题：如果最大电流保持 100mA，试问截止频率的改变会影响新截止频率点的电流吗？

【例 13-9】　某谐振电路的下截止频率为 8kHz，上截止频率为 12kHz，求带宽。

解：

$$BW = f_2 - f_1 = 12\text{kHz} - 8\text{kHz} = 4\text{kHz}$$

相关问题：试问当 $f_1 = 1.0\text{MHz}$、$f_2 = 1.2\text{MHz}$ 时带宽是多少？

13.4.3 滤波器响应的半功率点

前面已经提到，上、下截止频率有时称为**半功率频率**，采用这个名字是由于在该频率点电源输出的有功功率为谐振时的一半。对于串联谐振电路，谐振时，

$$P_{max} = I_{max}^2 R$$

而在 f_1（或 f_2）的功率为

$$P_{f1} = P_{f2} = (0.707 I_{max})^2 R = (0.707)^2 I_{max}^2 R = 0.5 I_{max}^2 R = 0.5 P_{max}$$

13.4.4 分贝度量

上、下截止频率的另一个常用名称是－3dB 频率，**分贝**（dB）是 10 乘以两个功率之比的对数值，它可以表达滤波器的输入与输出关系。下式是以分贝表示的功率比：

$$\text{dB} = 10\lg\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \tag{13-6}$$

用电压比表示的分贝公式基于前文利用相同电阻两端的电压表示功率比的公式。

$$\text{dB} = 20\lg\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \tag{13-7}$$

【例 13-10】　在某个频率，滤波器输出功率为 5W，输入功率为 10W，试用分贝表示功率比。

解：

$$10\lg\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)=10\lg\left(\frac{5W}{10W}\right)=10\lg(0.5)=-3.01dB$$

相关问题：试用分贝表示功率比 $V_{out}/V_{in}=0.2$。

－3dB 频率　在截止频率点，滤波器的输出下降了 3dB，我们知道，该频率就是输出电压等于谐振最大电压 70.7%的点，所以 70.7%点与低于最大值 3dB 是相同的，最大电压就是 0dB 参考。

$$20\log\left(\frac{0.707V_{max}}{V_{max}}\right)=20\lg(0.707)=-3dB$$

13.4.5　带通滤波器的选择性

图 13-22 的响应曲线也称为选择曲线。选择性定义了谐振电路对特定频率的响应与对其他频率抑制的好坏，带宽越窄选择性越好。

理想情况下，我们假设谐振电路对带宽内的频率完全接收而对带宽外的频率则完全抑制。实际情况并不是这样，因为带宽外的信号不能完全被抑制掉，但其幅度被大大衰减，离截止频率越远，衰减越大，如图 13-23a 所示。理想的选择性曲线如图 13-23b 所示。

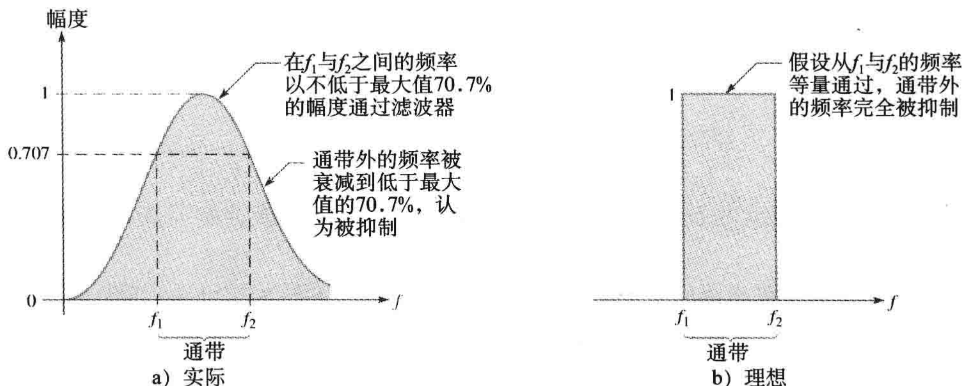


图 13-23　带通滤波器的一般选择性曲线

确定实际带通滤波器选择性的因素是响应曲线的陡度，如图 13-24 所示。对通带外频率选择性好的滤波器衰减（降低）的速度比选择性差的滤波器快。在通信系统中，利用具有高选择性的滤波器将希望的信号（例如某广播电台信号）与周边信号区分开来。

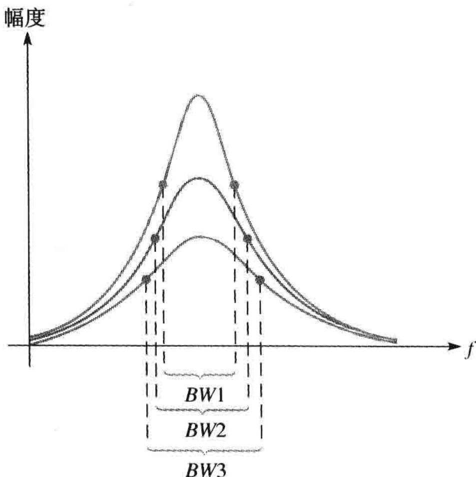


图 13-24　选择性曲线比较，最上边的曲线表示最好的选择性

13.4.6　谐振电路的品质因数

回顾 11.5 节定义的线圈品质因数（Q）为无功功率（特定频率）与消耗在线圈（L）线圈电阻的有功功率之比。在串联谐振电路中，电路的 Q 值包含所有与线圈串联的电阻，由于 R 不只是线圈电阻，所以电路的 Q 值比线圈的 Q 值低。串联谐振电路的 Q 值为 L 的无功功率与 R 的有功功率之比。品

质因数是谐振电路的重要指标，其导出公式如下：

$$Q=\frac{\text{无功功率}}{\text{有功功率}}=\frac{I^2X_L}{I^2R}$$

消去 I^2 项，得

$$Q=\frac{X_L}{R} \tag{13-8}$$

由于 X_L 随频率变化，Q 也随着频率变化，我们主要感兴趣的是在谐振点的 Q 值。注意相消的相同单位（欧姆）之比，因此 Q 本身无单位。因为是在线圈两端未加负载情况定义的，所以品质因数也叫做空载 Q 值。

【例 13-11】 求图 13-25 中电路谐振的 Q 值。

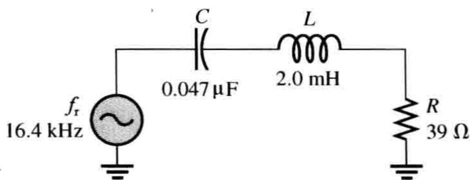


图 13-25

解： 求电感电抗

$$X_L=2\pi f_rL=2\pi\times16.4\text{kHz}\times2.0\text{mH}=206\Omega$$

品质因数为

$$Q=\frac{X_L}{R}=\frac{206\Omega}{39\Omega}=5.3$$

相关问题：如果图 13-25 中 C 减小一半，求谐振的 Q 值谐振频率将升高。

Q 值对带宽的影响 电路中 Q 值越高带宽越小，较低的 Q 值可得到较宽的带宽。用 Q 表示的谐振电路带宽公式为

$$BW=\frac{f_r}{Q} \tag{13-9}$$

【例 13-12】 试问图 13-26 中滤波器的带宽是多少？

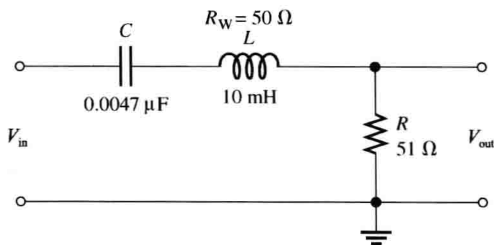


图 13-26

解： 总电阻为

$$R_{tot}=R+R_W=51\Omega+50\Omega=101\Omega$$

确定带宽如下

$$f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{10\text{mH}\times0.0047\mu\text{F}}}=23.2\text{kHz}$$

$$X_L=2\pi f_rL=2\pi\times23.2\text{kHz}\times10\text{mH}=1.46\text{k}\Omega$$

$$Q=\frac{X_L}{R_{tot}}=\frac{1.46\text{k}\Omega}{101\Omega}=14.5$$

$$BW=\frac{f_r}{Q}=\frac{23.2\text{kHz}}{14.5}=1.60\text{kHz}$$

相关问题：若图 13-26 中 L 变为 50mH 而线圈电阻相同，求带宽。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E13-12，通过测量确定带宽，试问这个结果与计算值相比有多接近？

13.4.7 带阻滤波器

基本串联谐振带阻滤波器如图 13-27 所示，注意输出电压取自电路的 LC 部分。这个滤波器与带通滤波器一样仍然是一个串联 RLC 电路，不同的是这里的输出电压是从 L 和 C 的组合两端取而不是在电阻两端。

带阻滤波器阻止上、下截止频率之间频率的信号通过，而允许下截止频率以下和上截止频率以上频率的信号通过，频率响应曲线如图 13-28 所示。上、下截止频率之间的频率范围称为

阻带，这种滤波器也称为频带消除滤波器、频带抑制滤波器或陷波滤波器。

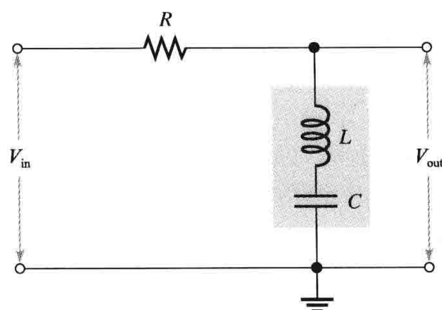


图13-27 基本串联谐振带阻滤波器

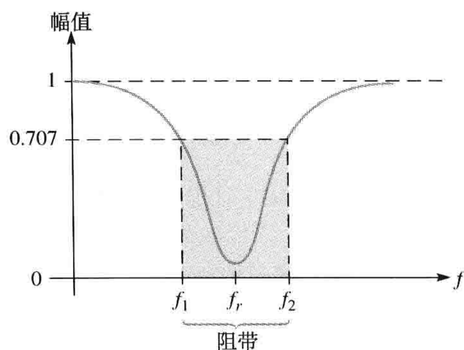
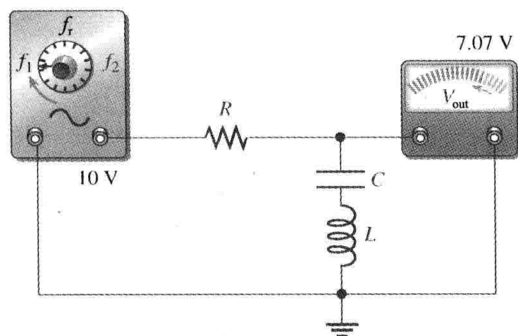


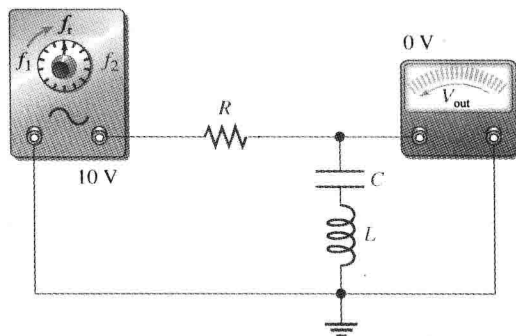
图13-28 带阻滤波器的一般频率响应曲线

带通滤波器中已讨论的所有特性都能适用于带阻滤波器，所不同的是响应曲线正好相反。对于带通滤波器，V_{out}在谐振时最大，而对带阻滤波器，V_{out}在谐振时最小。

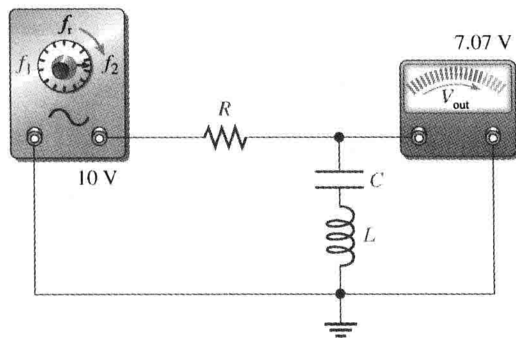
在频率非常低时，由于X_C很大LC组合呈现为近似开路，这样输入电压的绝大部分都通过到输出端，随着频率升高，LC组合的阻抗减小直至谐振时为零（理想情况），这时输入信号被短路到地，只有非常小的输出电压。随着频率升高超过了谐振点，LC阻抗增大，降在其两端的电压跟着增大。串联谐振带阻滤波器的一般频率响应曲线如图13-29所示。



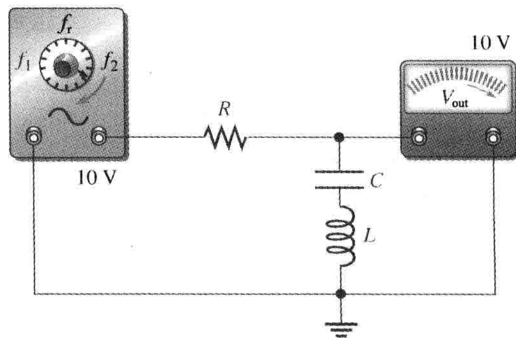
a) 当频率升高到f_1时，V_{out}从10V降到7.07V



b) 当频率从f_1升到f_2时，V_{out}从7.07V降到0V



c) 当频率从f_r升到f_2时，V_{out}从0V增到7.07V



d) 当频率升到高于f_2时，V_{out}向10V增大

图13-29 串联谐振带阻滤波器频率响应举例。V_{in}的有效值固定在10V，忽略线圈电阻

【例 13-13】 求图 13-30 中电路在 f_r的输出电压及带宽。

解： 由于谐振时 $X_L=X_L$，应用分压公式可以求得 V_{out}。

$$V_{out}=\left(\frac{R_W}{R_1+R_W}\right)V_{in}=\frac{30\Omega}{77\Omega}\times 100\text{mV}=39.0\text{mV}$$

求带宽如下：

$$f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{15\text{mH}\times 0.01\mu\text{F}}}=13.0\text{kHz}$$

$$X_L=2\pi f_r L=2\pi\times 13.0\text{kHz}\times 15\text{mH}=1.22\text{k}\Omega$$

$$Q=\frac{X_L}{R}=\frac{X_L}{R_1+R_W}=\frac{1.22\text{k}\Omega}{77\Omega}=15.9$$

$$BW=\frac{f_r}{Q}=\frac{13.0\text{kHz}}{15.9}=810\text{Hz}$$

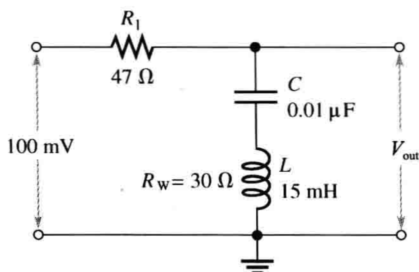


图 13-30

相关问题：试问如果频率升高到谐振点以上 V_{out}如何变化？谐振点以下呢？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E13-13，验证谐振频率的计算值，然后测量谐振输出电压，通过测量确定带宽。

本节测试题

1. 某带通滤波器谐振点的输出电压为 15V，试问在截止频率点的输出电压是多少？
2. 某带通滤波器 $f_r=120$kHz、$Q=12$，试问滤波器的带宽是多少？
3. 试问带阻滤波器在谐振点的电流是最大还是最小？谐振点的输出电压是最大还是最小？

13.5 并联 *RLC* 电路

本节我们将学习如何确定并联 *RLC* 电路的阻抗与相位角，讨论电流关系及串并联到并联的转换。

学习完本节内容，应该能够

- 分析并联 *RLC* 电路；
- 计算阻抗；
- 计算相位角；
- 确定所有电流；
- 将串并联 *RLC* 电路转换为等效并联形式。

13.5.1 阻抗与相位角

图 13-31 中电路由 *R*、*L* 和 *C* 的并联组合构成，将电导（*G*）和总电纳（B_{tot}）作相量相加可求出导纳，B_{tot}是电感电纳和电容电纳之差的绝对值。

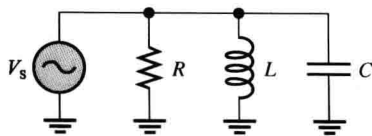


图 13-31 并联 *RLC* 电路

$$B_{tot}=|B_L-B_C|$$

因此，导纳的计算公式为

$$Y=\sqrt{G^2+B_{tot}^2}\qquad(13\text{-}10)$$

总阻抗是导纳的倒数

$$Z_{tot}=\frac{1}{Y}$$

电路相位角由下式给出

$$\theta = \arctan\left(\frac{B_{tot}}{G}\right) \tag{13-11}$$

当频率超过谐振值（$X_C < X_L$）时，由于电容性电流较大，总电流超前于电源电压，所以图 13-31 中电路的阻抗趋于电容性。当频率小于谐振值（$X_L < X_C$）时，电路的阻抗趋于电感性，总电流滞后于电源电压。

【例 13-14】　求图 13-32 并联 RLC 电路的总阻抗与相位角。

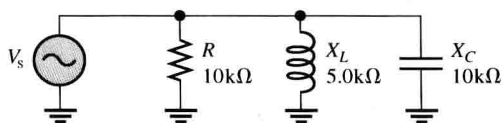


图　13-32

解： 首先求解导纳如下

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{10\text{k}\Omega} = 100\mu S$$

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{10\text{k}\Omega} = 100\mu S$$

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{5.0\text{k}\Omega} = 200\mu S$$

$$B_{tot} = |B_L - B_C| = 100\mu S$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B_{tot}^2} = \sqrt{(100\mu\text{S})^2 + (100\mu\text{S})^2} = 141.4\mu\text{S}$$

从 Y 可得 Z_{tot}。

$$Z_{tot} = \frac{1}{Y} = \frac{1}{41.4\mu\text{S}} = 7.07\text{k}\Omega$$

相位角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{B_{tot}}{G}\right) = \arctan\left(\frac{100\mu\text{S}}{100\mu\text{S}}\right) = 45°$$

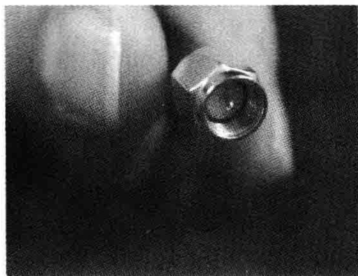
相关问题：试问图 13-32 中电路的阻抗倾向于电感性还是电容性?

13.5.2　电流关系

并联 RLC 电路中，电容支路的电流和电感支路的电流总是相差 180°（忽略线圈的电阻），由于这个原因，I_C 和 I_L 相减，流进 L 和 C 的总电流总是小于两个电流中的最大者，如图 13-33 所示，波形图如图 13-34 所示。当然，电阻支路的电流总是与两个电抗的电流相差 90°，如图 13-35 的相量图所示。注意，I_C 画在 y 轴的正向而 I_L 画在 y 轴的负向。总电流可表示为

$$I_{tot} = \sqrt{I_R^2 + I_{CL}^2} \tag{13-12}$$

式中，I_{CL} 为流进 L 和 C 支路的总电流，是两个电流之差的绝对值 $|I_C - I_L|$。



图片源自 Albert Lozano-Nieto/Fotolia

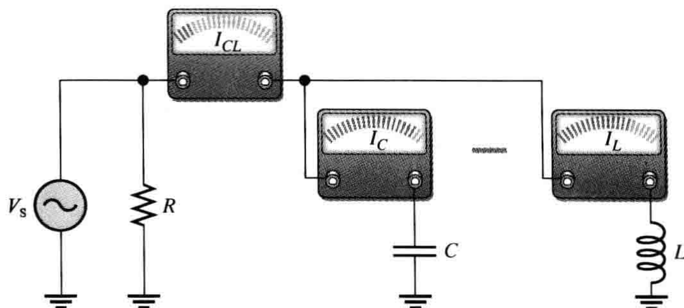


图 13-33　流入 C 和 L 并联组合的总电流为两个支路电流之差的绝对值（$I_{CL} = |I_C - I_L|$）

系统注释　同轴电缆

同轴电缆（简写coax）是用于传输高频率和快速脉冲波形的屏蔽电缆。屏蔽层构成电路的一个部分，可阻止外部信号对电缆内信号的影响。除了屏蔽层，描述同轴电缆特性的还有阻抗、衰减和电容。

相位角同样可以用支路电流表示为

$$\theta=\arctan\left(\frac{I_{CL}}{I_R}\right) \tag{13-13}$$

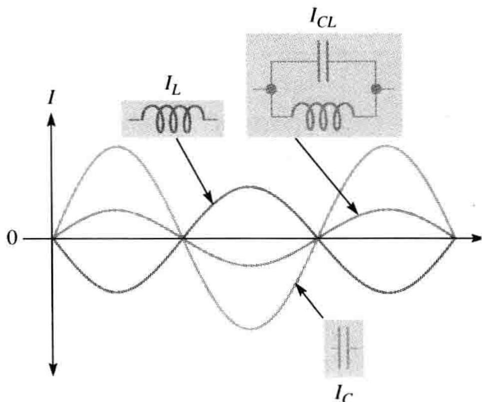


图13-34　I_C和I_L相减

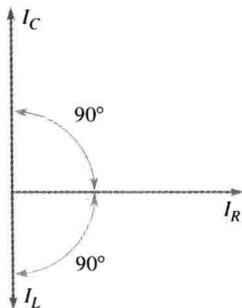


图13-35　并联RLC电路的电流相量图

【例13-15】　求图13-36中的支路电流与总电流，画出它们的关系图。

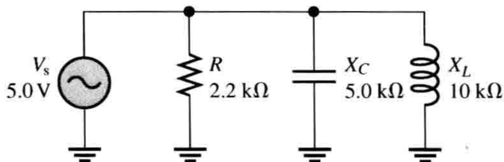


图　13-36

解：应用欧姆定律求各支路电流。

$$I_R=\frac{V_S}{R}=\frac{5.0\text{V}}{2.2\text{k}\Omega}=2.27\text{mA}$$

$$I_C=\frac{V_S}{X_C}=\frac{5.0\text{V}}{5.0\text{k}\Omega}=1.0\text{mA}$$

$$I_L=\frac{V_S}{X_L}=\frac{5.0\text{V}}{10\text{k}\Omega}=0.5\text{mA}$$

总电流是支路电流的相量之和。

$$I_{CL}=|I_C-I_L|=0.5\text{mA}$$

$$I_{tot}=\sqrt{I_R^2+I_{CL}^2}=\sqrt{(2.27\text{mA})^2+(0.5\text{mA})^2}=2.32\text{mA}$$

相位角为

$$\theta=\arctan\left(\frac{I_{CL}}{I_R}\right)=\arctan\left(\frac{0.5\text{mA}}{2.27\text{mA}}\right)=12.4°$$

总电流为2.32mA，超前于V_S12.4°，图13-37为电路的电流相量图。

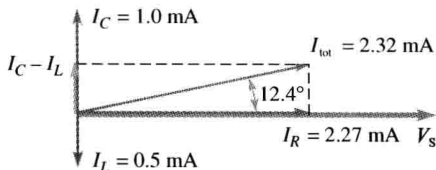


图13-37　电路的电流相量图

相关问题：如果图13-36中的频率升高，试问总电流是增大还是减小？

13.5.3　串并联到并联的转换

图13-38所示的特殊串并联结构在实际电路中很重要，因为电路中考虑了线圈的线圈电阻，它与L支路串联，再与C并联。

图13-38的串并联电路可视为图13-39的等效纯并联形式，等效形式可以简化并联谐振特性的分析，这部分内容将在13.6介绍。

等效电感L_{eq}和等效电阻$R_{p(eq)}$由下面式子给出：

$$L_{eq} = L\left(\frac{Q^2+1}{Q^2}\right) \tag{13-14}$$

$$R_{p(eq)} = R_W(Q^2+1) \tag{13-15}$$

其中，Q为线圈的品质因数X_L/R_W，公式的推导相当复杂，因此这里没有给出。注意，公式中对于$Q \geqslant 10$，L_{eq}近似于L的原始值，例如，如果$L=10\text{mH}$，$Q=10$，则

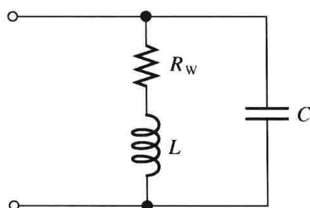


图13-38 串并联RLC电路（$Q=X_L/R_W$）

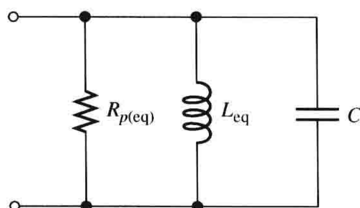


图13-39 图13-38电路的并联等效形式

$$L_{eq} = 10\text{mH} \times \frac{10^2+1}{10^2} = 10\text{mH} \times 1.01 = 10.1\text{mH}$$

两个电路的等效意味着在给定频率，当同样数值的电压加在两个电路时，两个电路的总电流相同，相位角也相同。基本上，简单的等效电路将使电路的分析更加方便。

【例13-16】 将图13-40中的串并联电路在给定频率转换为等效并联形式。

解： 求电感电抗。

$$X_L = 2\pi fL$$
$$= 2\pi \times 15.9\text{kHz} \times 5.0\text{mH}$$
$$= 500\Omega$$

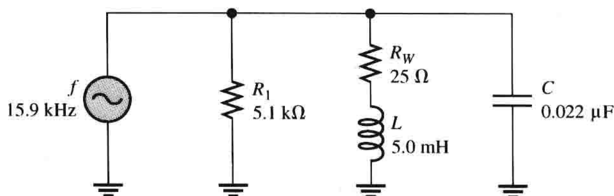


图 13-40

线圈的Q值为

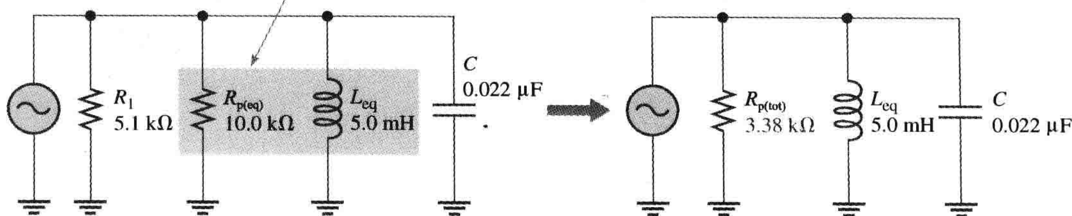
$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{500\Omega}{25\Omega} = 20$$

因为$Q>10$，所以$L_{eq} \approx L = 5.0\text{mH}$。

等效并联电阻为

$$R_{p(eq)} = R_W(Q^2+1) = 25\Omega \times (20^2+1) = 10.0\text{k}\Omega$$

等效电阻（$R_{p(eq)}$）与R_1并联，如图13-41a所示，组合起来得到总的并联电阻（$R_{p(tot)}$）为3.38kΩ，如图13-41b所示。



a) 图13-40电路的并联等效

b) $R_{p(tot)}=R_1 \| R_{p(eq)}=3.38\text{k}\Omega$

图 13-41

相关问题：如果图 13-40 中 $R_W=10\Omega$，求等效并联电路。

本节测试题

1. 在三支路并联电路中，某频率时 $R=1500\Omega$、$X_C=1000\Omega$、$X_L=500\Omega$，求当 $V_S=12V$ 时各个支路的电流。
2. 问题 1 的电路是电容性还是电感性？为什么？
3. 20mH 线圈带有 10Ω 的线圈电阻，求在 1kHz 频率时的等效并联电感和电阻。

13.6 并联谐振

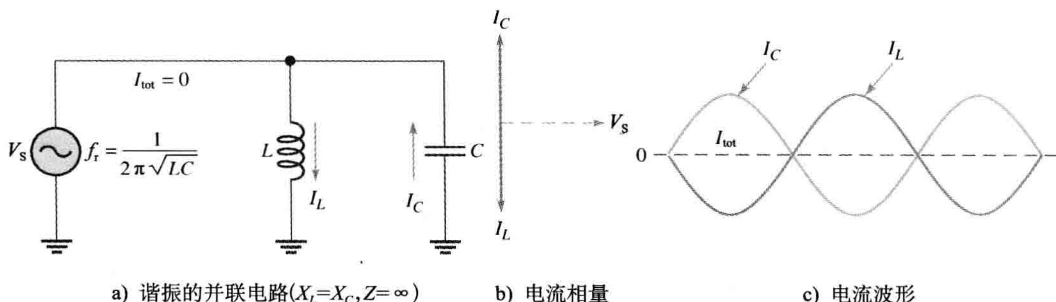
本节我们将首先来看理想并联 LC 电路的谐振条件，然后将线圈电阻考虑进来，研究更实际的情况。

学习完本节内容，应该能够

- 分析并联谐振电路；
- 说明理想电路的并联谐振；
- 说明非理想电路的并联谐振；
- 解释阻抗怎样随频率变化；
- 确定谐振点的电流与相位角；
- 确定并联谐振频率；
- 讨论并联谐振电路的负载效应。

13.6.1 理想并联谐振的条件

理想情况下，并联谐振发生在 $X_L=X_C$时。和串联谐振一样，发生谐振的频率称为谐振频率。当 $X_L=X_C$时，两个支路电流 I_C和 I_L大小相等而相位相差 180°，因此两个电流互相抵消，总电流为零，如图 13-42 所示。在这种理想情况下，线圈的线圈电阻假定为零。



a) 谐振的并联电路($X_L=X_C$, $Z=\infty$)　b) 电流相量　c) 电流波形

图 13-42 谐振的理想并联 LC 电路

由于总电流为零，所以并联 LC 电路的阻抗为无穷大（∞），理想谐振条件可表述如下：

$$X_L=X_C$$
$$Z_r=\infty$$

13.6.2 并联谐振频率

对于理想并联谐振电路，谐振发生的频率公式和串联谐振电路相同。

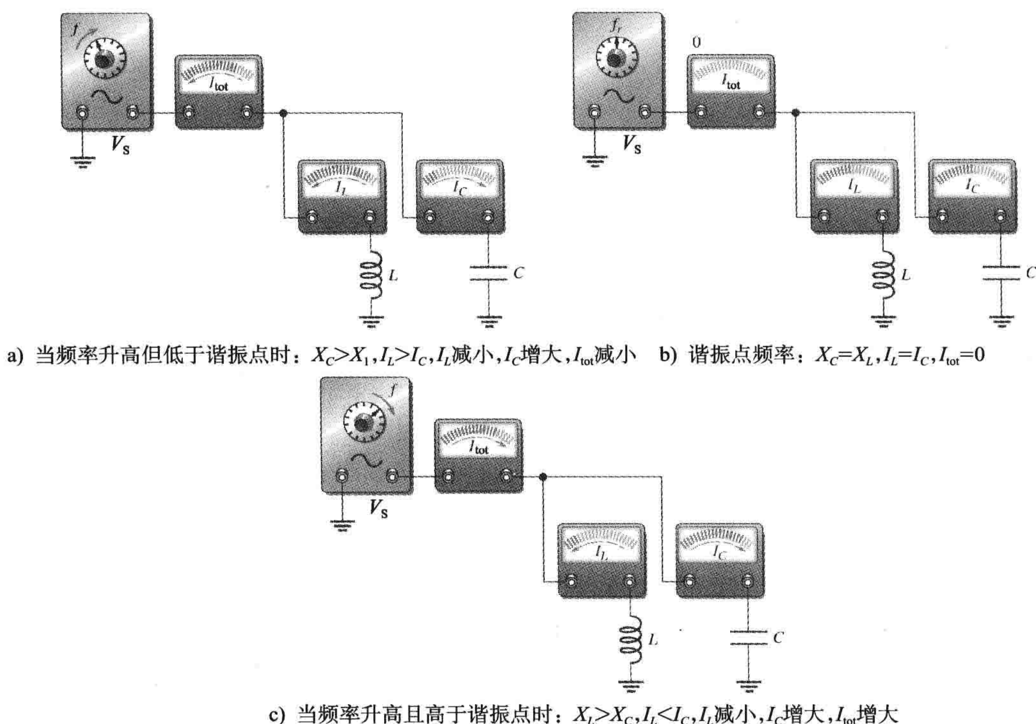
$$f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{13-16}$$

13.6.3 并联谐振电路的电流

并联 LC 电路中的电流随着频率的升高而变化：从低于谐振频率逐步升高经过谐振频率再到高于谐振频率变化，图 13-43 显示了理想电路中电流的一般响应情况。

低于谐振频率 图13-43a表明了电源频率从零向 f_r 升高的响应。在频率非常低时，X_C 非常高而 X_L 非常低，所以绝大部分电流都流经 L。随着频率升高，流经 L 的电流减小而流经 C 的电流增大，使总电流减小。任何时刻 I_L 和 I_C 相位都相差180°，因此总电流总是两个支路电流之差。这期间，总电流减小表明阻抗在不断增大。

谐振频率 当频率达到谐振频率 f_r 时，如图13-43b所示，X_C 和 X_L 相等，因为两个电流大小相等相位相反，所以 I_C 和 I_L 相互抵消，这时总电流达到最小值零。因为 $I_{tot}=0$，所以 Z 为无穷大，因此，理想 LC 电路在 f_r 时呈现为开路。



a) 当频率升高但低于谐振点时：$X_C>X_L$，$I_L>I_C$，I_L 减小，I_C 增大，I_{tot} 减小 b) 谐振点频率：$X_C=X_L$，$I_L=I_C$，$I_{tot}=0$

c) 当频率升高且高于谐振点时：$X_L>X_C$，$I_L<I_C$，I_L 减小，I_C 增大，I_{tot} 增大

图13-43 频率从低于谐振到高于谐振变化并联 LC 电路的电流响应（电源电压幅度保持恒定）

高于谐振频率 当频率升至高于谐振点时，如图13-13c所示，X_C 继续减小而 X_L 继续增大，又使支路电流不相等，I_C 较大，结果总电流开始增大，阻抗减小。当频率非常高时，非常低的 X_C 与非常高的 X_L 并联，X_C 占主导，所以阻抗也变得非常小。

总之，并联谐振时阻抗达到最大峰值，电流降至最小，流进 L 和 C 的总电流为

$$I_{tot}=|I_L-I_C| \tag{13-17}$$

小贴士 用函数发生器检查 LC 电路的谐振频率时，信号发生器的戴维南电阻将使电路的 Q 值降低，600Ω内阻的信号发生器会显著扩大谐振电路的带宽。为了提高 Q 值以获得窄带宽，需要在信号发生器输出串联电阻。该方法的缺点是发生器输出信号的振幅减小。

【例13-17】 通信接收机中的谐振电路由680μH电感与180pF电容并联构成，如图13-44所示。

(a) 试问谐振频率是多少?

(b) 如果并联组合两端的电压为2.0V，试问每个元件的电流及总电流是多少?

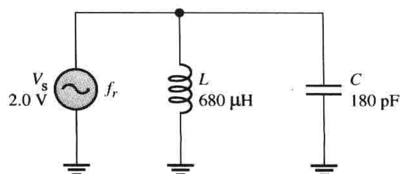


图 13-44

解：（a）谐振频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{680\text{mH}\times 180\text{pF}}} = 455\text{kHz}$$

（b）
$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 455\text{kHz}\times 680\mu\text{H} = 1.94\text{k}\Omega$$

$$X_C = X_L = 1.94\text{k}\Omega$$

$$I_L = \frac{V_S}{X_L} = \frac{2.0\text{V}}{1.94\text{k}\Omega} = 1.03\text{mA}$$

$$I_C = I_L = 1.03\text{mA}$$

谐振时的总电流为

$$I_{tot} = |I_L - I_C| = 0\text{A}$$

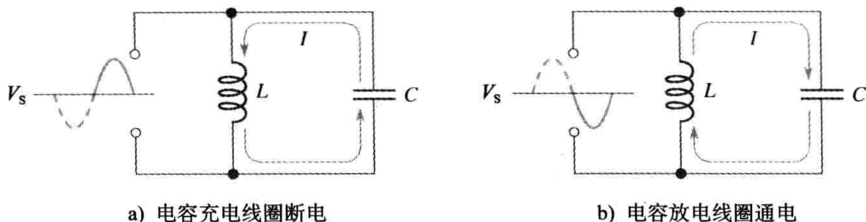
相关问题：如果电路调到 470kHz，求电感和电容中的电流。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E13-17，通过测量确定谐振频率。求在谐振频率时流过 L 和 C 的电流。

13.6.4　振荡电路

并联 LC 电路常称为振荡电路，这是因为并联谐振电路将能量存储在电感的磁场中和电容的电场中，储存的能量在电容和线圈之间来回传输，半个周期电流以一个方向流动，另半个周期电流以相反方向流动，相应的电感和电容交替充电和失电，如图 13-45 所示。

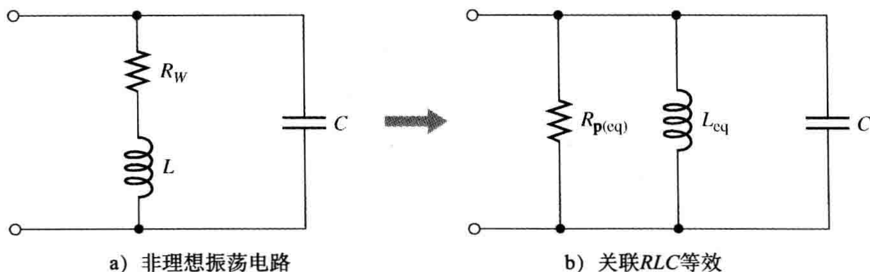


a）电容充电线圈断电　　b）电容放电线圈通电

图 13-45　理想并联谐振振荡电路的能量存储

13.6.5　非理想电路的并联谐振条件

到目前为止，我们都只是讨论理想的并联 LC 电路，现在要将线圈电阻考虑进来，图 13-46 显示了非理想的振荡电路及其并联 RLC 等效。



a）非理想振荡电路　　b）关联RLC等效

图 13-46　包含线圈电阻的并联谐振电路实际处理

如果线圈电阻是电路中的唯一电阻，则电路在谐振时的品质因数 Q 就是线圈的 Q 值。

$$Q = \frac{X_L}{R_W}$$

Q值还可以用电路元件值表示为

$$Q=\frac{1}{R_W}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

上面关于Q的式子只包含了线圈的线圈电阻R_W，而忽略了其他可能存在的电阻，电压源的内阻和负载电阻都可能降低Q值。测量Q值的常用方法是在电路中插入一个称为检测电阻的小电阻，检测电阻引入最小的负载效应，但只降低很小的电压就能确定电流。实验手册[⊖]中的实验27演示了如何利用检测电阻测量谐振电路的Q值。

等效电感和等效并联电阻的表达式由式（13-14）和式（13-15）给出

$$L_{eq}=L\left(\frac{Q^2+1}{Q^2}\right)$$

$$R_{p(eq)}=R_W(Q^2+1)$$

当$Q\geqslant 10$时，$L_{eq}\approx L$。

在并联谐振时，$X_{L(eq)}=X_C$

在实际等效电路中，$R_{p(eq)}$与理想线圈和电容并联，所以L和C支路表现为理想的振荡电路，具有无穷大的谐振阻抗，如图13-47所示。因此，非理想振荡电路谐振总阻抗可简单表示为等效并联电阻。

$$Z_r=R_W(Q^2+1)$$

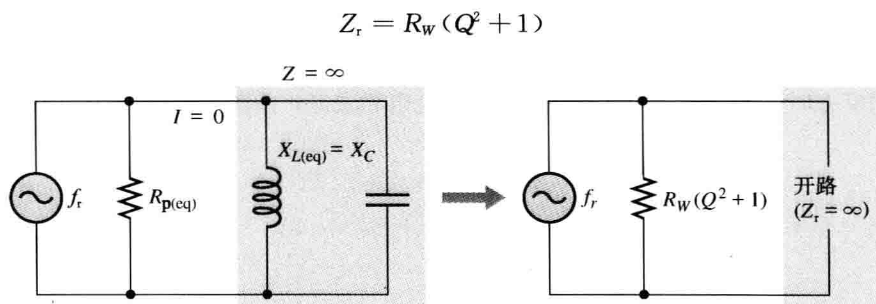


图13-47 谐振时并联LC表现为开路，电源仅见到$R_{p(eq)}$，其值等于$R_W(Q^2+1)$

【例13-18】 求图13-48中电路在谐振频率（$f_r\approx 17\,794$Hz）的阻抗。

解： 计算阻抗之前，必须确定品质因数。为得到Q，先求电感电抗。

$$X_L=2\pi fL=2\pi\times 17\,794\text{Hz}\times 8.0\text{mH}=894\Omega$$

$$Q=\frac{X_L}{R_W}=\frac{894\Omega}{50\Omega}=17.9$$

$$Z_r=R_W(Q^2+1)=50\Omega\times(17.9^2+1)=16.0\text{k}\Omega$$

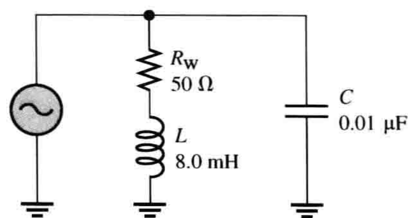


图 13-48

相关问题：如果线圈电阻为10Ω，试确定图13-48中的Z_r。

13.6.6 阻抗随频率的变化

并联谐振电路的阻抗在谐振频率最大，低于或高于谐振频率阻抗下降，如图13-49曲线所示。

在频率非常低时，X_L很小而X_C很高，所以总阻抗基本上就等于电感支路的阻抗，随着频

⊖ *Experiments for DC/AC Fundamentals: A System Approach*，作者 David M. Buchla.

率的升高，阻抗也跟着增大，电感电抗为主导（因为 $X_L < X_C$），直至谐振频率时 $X_L \approx X_C$（因为 $Q > 10$），阻抗达到最大值。随着频率继续升高到交于谐振频率，电容电抗成为主导（因为 $X_C < X_L$），阻抗减小。

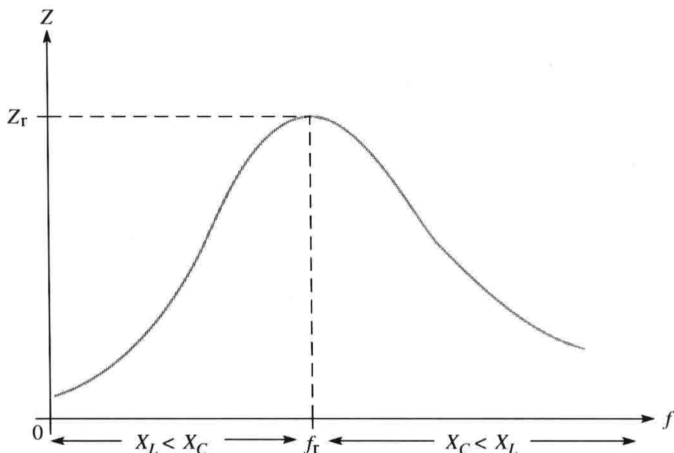


图 13-49 并联谐振电路的一般阻抗曲线。$f < f_r$ 时电路呈电感性，$f = f_r$ 时电路呈电阻性，$f > f_r$ 时电路呈电容性

13.6.7 谐振电流与相位

理想振荡电路中，由于谐振时阻抗为无穷大，电源总电流为零。在非理想情况下，谐振频率存在一定的电流，它由谐振阻抗决定。

$$I_{tot} = \frac{V_S}{Z_r} \qquad (13\text{-}18)$$

谐振频率时阻抗为纯电阻，所以，并联谐振电路谐振时的相位角是 0°。

13.6.8 非理想电路的并联谐振频率

我们知道，考虑了线圈电阻后谐振条件为

$$X_{L(eq)} = X_C$$

可以将其表示成

$$2\pi f_r L\left(\frac{Q^2+1}{Q^2}\right) = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

用 Q 解 f_r，得

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\sqrt{\frac{Q^2}{Q^2+1}}$$

当 $Q \geqslant 10$，含 Q 因子的项接近 1。

$$\sqrt{\frac{Q^2}{Q^2+1}} = \sqrt{\frac{100}{101}} = 0.995 \approx 1$$

因此，只要 Q 大于等于 10，并联谐振频率就近似和串联谐振频率相同。

$$f_r \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \text{当 } Q \geqslant 10$$

对于线圈 R_W 为电路中唯一电阻的情况，用元件值表示的谐振频率准确表达式为

$$f_r = \frac{\sqrt{1-(R_W^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (13\text{-}19)$$

这个精确表示很少使用，因为大多数实际情况采用简化的式子 $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 就足够了，不过，下面的例子说明了式（13-19）的应用。

【例 13-19】 对图 13-50 中的电路应用公式（13-19）求谐振时的频率、阻抗和总电流。

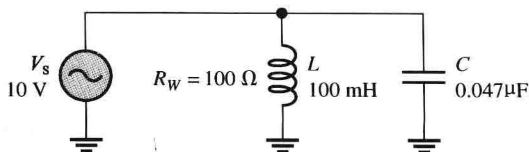


图 13-50

解： 精确的谐振频率是

$$f_r = \frac{\sqrt{1-(R_W^2 C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$= \frac{\sqrt{1-[(100\Omega)^2 \times 0.047\mu F/(100mH)]}}{2\pi\sqrt{0.047\mu F \times 100mH}}$$

$$= 2.32kHz$$

计算阻抗如下

$$X_L = 2\pi f_r L = 2\pi \times 2.32kHz \times 100mH = 1.46k\Omega$$

$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{1.46k\Omega}{100\Omega} = 14.6$$

$$Z_r = R_W(Q^2+1) = 100\Omega \times (14.6^2+1) = 21.4k\Omega$$

总电流为

$$I_{tot} = \frac{V_S}{Z_r} = \frac{10V}{21.4k\Omega} = 467\mu A$$

相关问题：利用公式 $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 重做本例，比较两者的结果。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E13-19，通过测量确定谐振频率，求谐振频率的总电流和流过 L 和 C 的电流。将测量结果与计算值作比较，结果怎样？

13.6.9 外部负载电阻对振荡电路的影响

在没有负载电阻的基本并联谐振电路中，电路的 Q 值仅由线圈的 Q 值和由电源电阻引入的部分负载决定。然而，电源的负载效应具有复杂的频率相关性，谐振时电源电阻上只有因谐振电路非理想特性而形成的很小电流，当电路偏离谐振，因为相移这个电流增大。为了简化讨论，我们将忽略电源负载的效应。

在如图 13-51a 所示的大多数实际电路中，外部负载（R_L）消耗了电源提供的大部分功率，这时负载电阻将降低电路的 Q 值——负载电阻越小，Q 越低。负载电阻 R_L 直接和线圈的等效并联电阻 $R_{p(eq)}$ 相并联，二者的组合确定了总的并联电阻 $R_{p(tot)}$，如图 13-51b 所示，其值由下式给出

$$R_{p(tot)} = R_L \parallel R_{p(eq)} \tag{13-20}$$

空载的振荡电路 $R_{p(tot)}$ 约为 $R_{p(eq)}$。

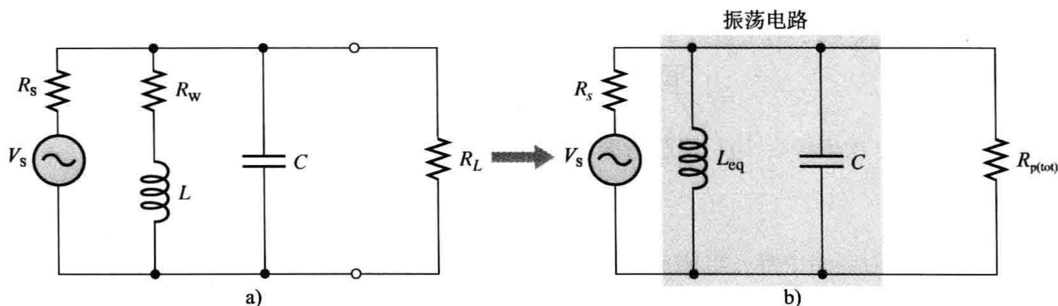


图 13-51 带有负载电阻的振荡电路及其等效电路

总体 Q 值记为 Q_O，由下面的近似式给出

$$Q_O \approx \frac{R_{p(tot)}}{X_L} \tag{13-21}$$

注意，这个公式把串联电路 Q 值或电感的 Q 值公式翻转了，然而空载并联电路将给出和电感 Q 值相同的结果，因此空载时两个式子都可使用。

系统举例 13-1 基本金属探测器

谐振电路用于许多振荡器中。图 13-52 显示了使用两个振荡器构成的基本金属探测器电

路。振荡器-1的谐振电路是本例的重点，显示在左边突出显示框中。这是一个考毕兹振荡器，在系统举例9-1中首次介绍。当振荡器靠近金属时，感应线圈的电感（L_1）发生变化，振荡器的频率也随之改变。

为了计算振荡器-1的振荡频率，我们应用

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

电容C_1几乎对谐振频率没有影响，可以忽略，但它在电路中隔离直流。C_2和C_3串联与L一起构成等效振荡电路（或并联谐振电路）。

振荡器-2设计振荡在与振荡器-1稍微不同的频率，它提供一个固定的参考频率，与振荡器-1产生的频率相互作用。两个振荡器输出在非线性混频器中混合（叠加定理说明电源只可线性叠加，所以不能应用在这种情况），通过在非线性电路中对信号进行混频，输出两个新频率：振荡器-1的频率与振荡器-2的频率之和、两个频率之差，较低的差频叫做拍频。由L_2和R_4构成的低通滤波器仅允许音频范围的拍频通过，经过放大并传送到耳机。

当振荡器-1接近金属时由于磁耦合引起电感减小使得振荡频率改变，结果拍频也跟着改变，在耳机中能够听到变化的啸叫声。

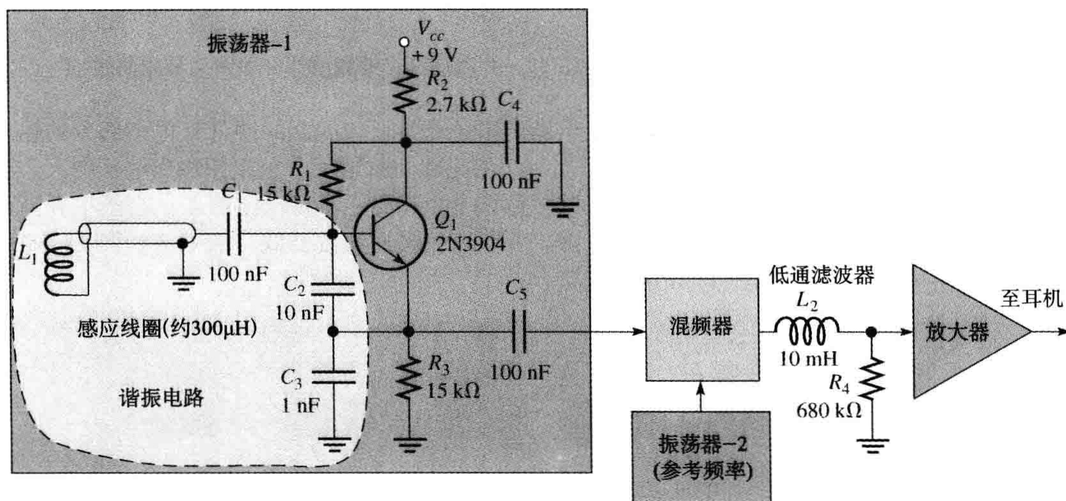


图13-52 金属探测器电路

本节测试题

1. 试问并联谐振时阻抗最大还是最小？
2. 试问并联谐振时电流最大还是最小？
3. 理想并联谐振的X_L=1.5kΩ，试问X_L是多少？
4. 振荡电路具有下列值：R_W=5.0Ω，L=220μH，C=0.10μF，计算f_r和Z_r。
5. 如果Q=25，L=50mH，C=1000pF，试问f_r是多少？
6. 在问题5中，如果Q=2.5，试问f_r是多少？
7. 某个振荡电路的线圈电阻为20Ω，如果Q=20，试问谐振时的总阻抗是多少？

13.7 并联谐振滤波器

并联谐振电路常用于带通和带阻滤波器中。
学习完本节内容，应该能够

- 分析并联谐振滤波器的工作原理；
- 说明如何实现带通滤波器；
- 定义带宽；
- 解释负载效应对选择性的影响；
- 说明如何实现带阻滤波器；
- 确定并联谐振带通和带阻滤波器的谐振频率、频带宽度和输出电压。

13.7.1　带通滤波器

基本并联谐振带通滤波器如图 13-53 所示，注意这个应用中从振荡电路的两端输出。

并联谐振带通滤波器的带宽和截止频率的定义与串联谐振电路相同，13.4 节给出的计算公式仍然可用，说明 V_{out} 和 I_{tot} 随频率变化的通用带通频率响应曲线分别如图 13-54a 和图 13-54b 所示。

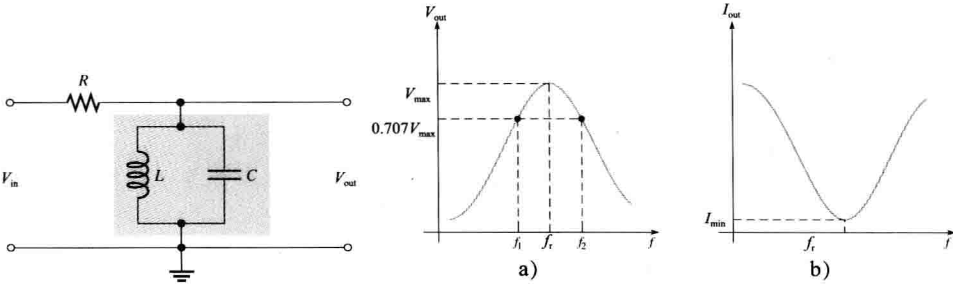
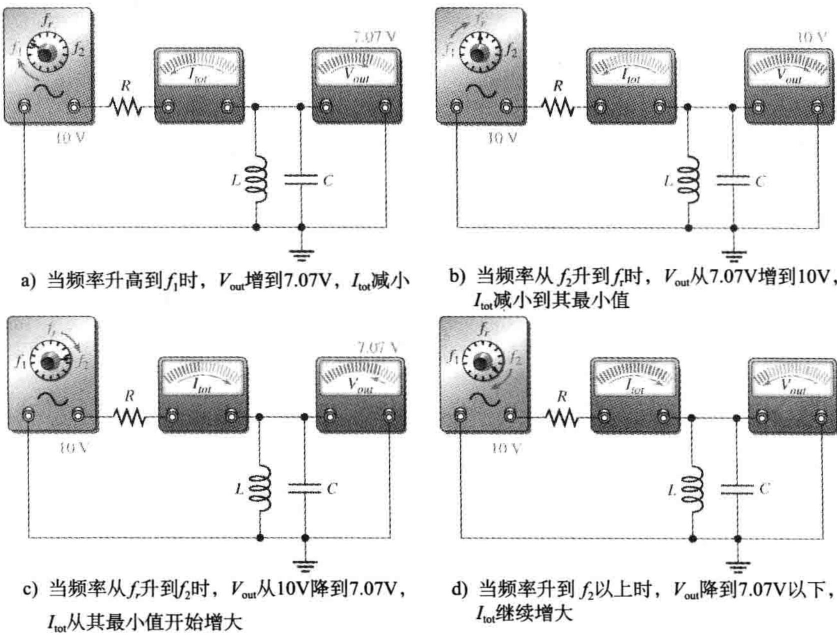


图13-53　基本并联谐振带通滤波器　　图 13-54　并联谐振带通滤波器一般频率响应曲线

滤波作用如下：在频率非常低时，振荡电路的阻抗非常低，因此两端只有很小部分的输入电压降，其余均降在 *R* 两端。随着频率的升高，振荡电路阻抗增大，结果使输出电压增大，当频率达到谐振值时，阻抗达到最大值，绝大部分输入电压都降在振荡电路两端。当频率升高超过谐振点，阻抗开始下降，使输出电压也下降。并联谐振带通滤波器的一般响应如图 13-55 所示，该图说明了电流和输出电压随频率的变化。



a) 当频率升高到 f_1 时，V_{out} 增到7.07V，I_{tot} 减小

b) 当频率从 f_2 升到 f_r 时，V_{out} 从7.07V增到10V，I_{tot} 减小到其最小值

c) 当频率从 f_r 升到 f_2 时，V_{out} 从10V降到7.07V，I_{tot} 从其最小值开始增大

d) 当频率升到 f_2 以上时，V_{out} 降到7.07V以下，I_{tot} 继续增大

图 13-55　并联谐振带通滤波器频率响应举例（输入电压有效值恒定为 10V）

【例13-20】 某并联谐振低通滤波器在 f_r 时的最大输出电压为4V，试问在截止频率的 V_{out} 值是多少？

解： 在截止频率的 V_{out} 是最大值的70.7%。

$$V_{out(1)} = V_{out(2)} = 0.707V_{out(max)} = 0.707 \times 4V = 2.83V$$

相关问题：如果谐振频率的 V_{out} 为10V，试问截止频率的 V_{out} 值是多少？

【例13-21】 并联谐振电路的下截止频率为3.5kHz，上截止频率为6kHz，试问其带宽是多少？

解：

$$BW = f_2 - f_1 = 6kHz - 3.5kHz = 2.5kHz$$

相关问题：滤波器的下截止频率为520Hz，带宽为10kHz，试问其上截止频率为多少？

【例13-22】 某并联谐振带通滤波器的谐振频率为12kHz，Q 值为10，试问其带宽是多少？

解：

$$BW = \frac{f_r}{Q} = \frac{12kHz}{10} = 1.2kHz$$

相关问题：某并联谐振带通滤波器的谐振频率为100MHz，带宽为4MHz，试问 Q 是多少？

负载效应 当电阻负载接到滤波器输出端时，如图13-56a所示，滤波器的 Q 值下降，由于 $BW=f_r/Q$，所以带宽增大，降低了选择性。因为 R_L 直接与 $R_{p(eq)}$ 并联，滤波器谐振时的阻抗也下降，因此通过 $R_{p(tot)}$ 和电源内阻 R_s 的分压效应得到的最大输出电压下降，如图13-56b所示。图13-56c显示了负载对例13-23中所述特定谐振电路的影响，图中显示负载效应降低了峰值同时展宽了带宽。

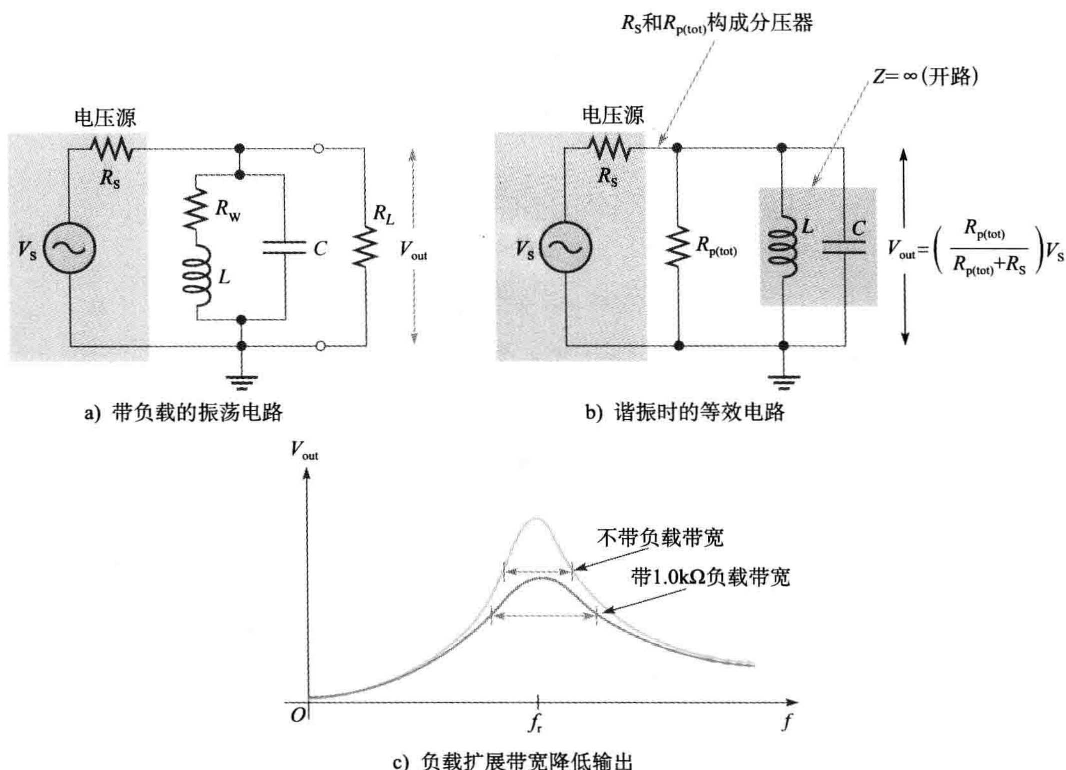
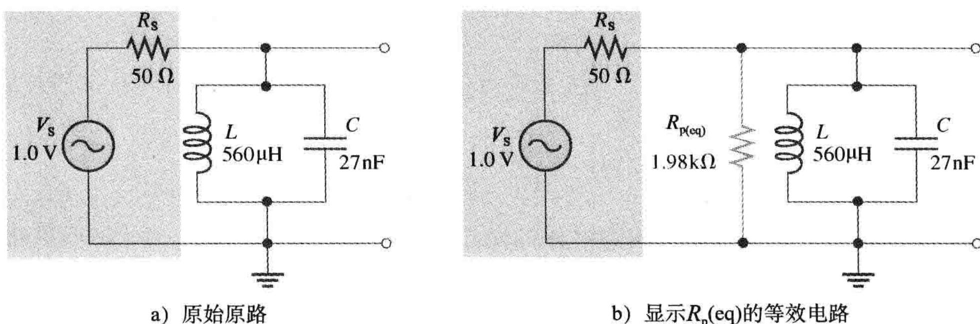


图13-56 并联谐振带通滤波器的负载效应（图13-53中的电阻 R 现在用电源内阻 R_s 表示）

【例13-23】 (a)对图13-57a中的滤波器求 f_r、V_{out}、BW，其中电感的线圈电阻为10.5Ω，电源内阻50Ω。

(b)当滤波器带1.0kΩ负载时重新做(a)，并比较结果。



a) 原始原路　　b) 显示R_p(eq)的等效电路

图 13-57

解：(a) $f_r=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{560\mu H\times 27nF}}=40.9kHz$

电路不带负载，为求输出电压，从求线圈的Q值和 $R_{p(eq)}$ 开始。

$$X_L=2\pi fL=2\pi\times 40.9kHz\times 560\mu H=144\Omega$$

$$Q=\frac{X_L}{R_W}=\frac{144\Omega}{10.5\Omega}=13.7$$

应用公式(13-15)计算 $R_{p(eq)}$（线圈的并联等效电阻）。

$$R_{p(eq)}=R_W(Q^2+1)=10.5\Omega\times(13.7^2+1)=1.98k\Omega$$

由于电路不带负载，所以 $R_{p(tot)}=R_{p(eq)}=1.98k\Omega$，如图13-57b所示。谐振时振荡电路视为开路，对 R_s 和 $R_{p(tot)}$ 利用分压公式求 V_{out}。

$$V_{out}=\left(\frac{R_{p(tot)}}{R_{p(tot)}+R_s}\right)V_S=\frac{1.98k\Omega}{1.98k\Omega+50\Omega}\times 1.0V=975mV$$

应用公式(13-21)计算BW。

$$Q_O\approx\frac{R_{p(tot)}}{X_L}\approx\frac{1.98k\Omega}{144\Omega}=13.8$$

注意，这和电感单独的Q值相同（舍入误差内），因为电路空载。

$$BW=\frac{f_r}{Q_O}=\frac{40.9kHz}{13.8}=2.96kHz$$

(b)负载对谐振频率没有明显的影响，谐振频率等于

$$f_r=40.9kHz$$

由于负载和 $R_{p(eq)}$ 并联，将降低输出电压。利用公式(13-20)

$$R_{p(tot)}=R_L\parallel R_{p(eq)}=1.0k\Omega\parallel 2.07k\Omega=647\Omega$$

应用分压公式

$$V_{out}=\left(\frac{R_{p(tot)}}{R_{p(tot)}+R_s}\right)V_S=\frac{647\Omega}{647\Omega+50\Omega}\times 1.0V=930mV$$

应用公式(13-21)计算BW。

$$Q_O=\frac{R_{p(tot)}}{X_L}=\frac{647\Omega}{144\Omega}=4.68$$

$$BW=\frac{f_r}{Q_O}=\frac{40.9kHz}{4.68}=8.74kHz$$

负载降低了输出电压并使频带宽度增大。

相关问题：试问 Q_O受大阻值的负载电阻影响怎样？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E13-23，将频率特性图示仪接在作电流-电压转换的“检测电阻”两端来观察响应，比较 Multisim 结果与本例计算值，在频率特性图示仪上观察响应，试着改变线圈线圈电阻，看看会发生什么。

13.7.2　带阻滤波器

基本并联谐振带阻滤波器如图 13-58 所示，输出电压从与振荡电路串联的负载电阻两端取出。这种结构负载电阻对 Q 值影响很小，通常可以忽略。

振荡电路阻抗随频率变化产生的频率响应与前面讨论的结果相同，即谐振时电流最小，而谐振两边电流都增大。由于输出电压从串联负载电阻两端取出，所以输出电压随着电流变化，因此可以得到图 13-59 所示的带阻频率响应特性。

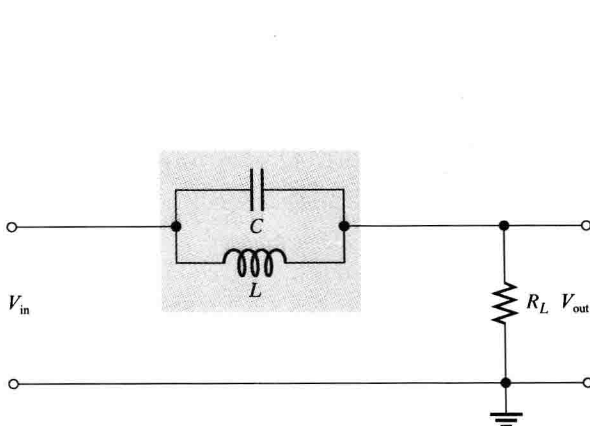


图 13-58　基本并联谐振带阻滤波器

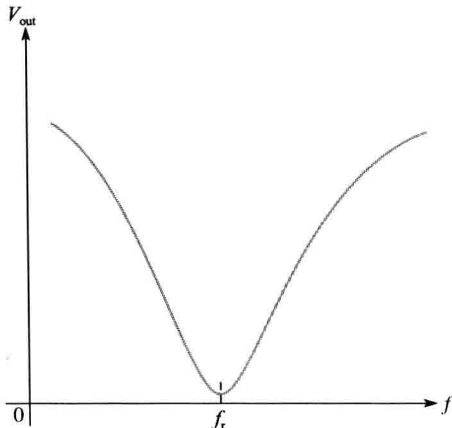


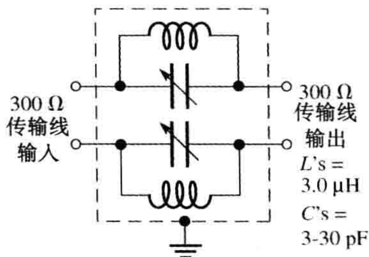
图 13-59　带阻滤波器响应

实际上图 13-58 的带阻滤波器可以看成是一个由振荡电路的 Z_r与负载电阻构成的分压器，因此在 f_r时的输出电压为

$$V_{out} = \left(\frac{R_L}{R_L + Z_r}\right)V_{in}$$

系统注释：陷波电路

陷波电路是一种专门设计用于减小特定信源发出干扰的谐振电路，例如，阻止 27MHz 公用波段无线电的陷波电路是一个调谐在该频率的并联谐振电路，其他频率通过受的影响很小。右面所示的电路是一个插在 300Ω 双绞线中的陷波器，300Ω 双绞线是一种常用的射频传输线，陷波器安装在接地的屏蔽壳内。



【例 13-24】　图 13-60 显示了例 13-23 的振荡电路，该电路用于带阻滤波器，电感的线圈电阻为 10.5Ω，试求 f_r和谐振时的 V_{out}。

解： 谐振频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{560\mu\text{H} \times 27\text{nF}}} = 40.9\text{kHz}$$

确定 V_{out} 如下：

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \times 40.9\text{kHz} \times 560\mu\text{H} = 144\Omega$$

$$Q = \frac{X_L}{R_W} = \frac{144\Omega}{10.5\Omega} = 13.7$$

应用式（13-15）

$$R_{p(eq)} = R_W(Q^2 + 1) = 10.5\Omega \times (13.7^2 + 1) = 1.98\text{k}\Omega$$

谐振时

$$V_{out} = \left(\frac{R_L}{R_L + R_{p(eq)}}\right)V_{in} = \frac{1.0\text{k}\Omega}{1.0\text{k}\Omega + 1.98\text{k}\Omega} \times 1.0\text{V} = 335\text{mV}$$

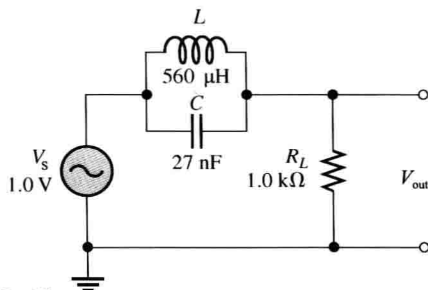


图　13-60

相关问题：如果负载电阻为470Ω，试问谐振频率的输出是多少？

Multisim 仿真

打开Multisim仿真文件E13-24，比较Multisim结果与计算结果，可在频率特性图示仪上读出谐振频率和输出电压。

本节测试题

1. 试问怎样能够增大并联谐振滤波器的带宽？
2. 某高Q值滤波器的谐振频率为5kHz，如果Q降到2，试问f_r会变化吗？如果会变化，它的值会是多少？
3. 如果$R_W = 75\Omega$、$Q = 25$，试问谐振频率时振荡电路的阻抗是多少？

13.8　谐振电路的应用

谐振电路应用广泛，特别是在通信系统中。本节我们将通过几个系统应用说明谐振电路在电子通信的重要性。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论谐振电路的应用；
- 描述调谐放大器和双调谐变压器耦合；
- 描述天线耦合；
- 描述调幅无线接收机。

13.8.1　调谐放大器

调谐放大器是一种放大特定频带信号的电路。通常情况下，将一个并联谐振电路和放大器相结合来实现选择性。一般放大器输入端可接收很宽频带范围的输入信号并且对其进行放大，而谐振电路只允许相对较窄频带的信号通过。可调电容可在输入频率范围内调谐使得能够选择到希望的频率，如图13-61所示。

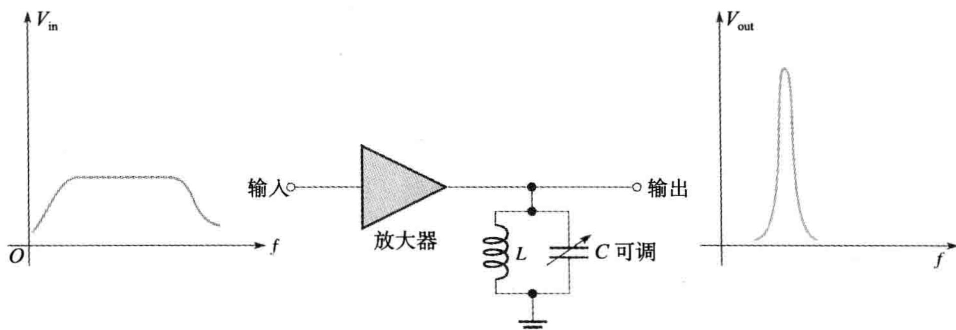


图13-61　基本调谐带通放大器

13.8.2　接收机中的双调谐变压器耦合

有些种类的通信接收机中，可使用变压器将多个放大器耦合起来以增大放大量，变压器的一次绕组和二次绕组分别并联电容构成两个耦合在一起的并联谐振带通滤波器，这种技术可以展宽频带并使响应曲线更加陡峭，如图 13-62 所示，因此提高了对希望频带的选择性。

13.8.3　接收机的天线输入

从发射机发出的无线电信号由电磁波通过空间传播，电磁波切割接收天线时感应出小的电压。在很宽范围的电磁频率中，必须只有一个频率或有限的频带的信号被提取出来。图 13-63 显示了一个典型的由变压器（第 14 章介绍）耦合到接收机输入的天线结构。接在变压器二次绕组上与可调电容构成了一个并联谐振电路。

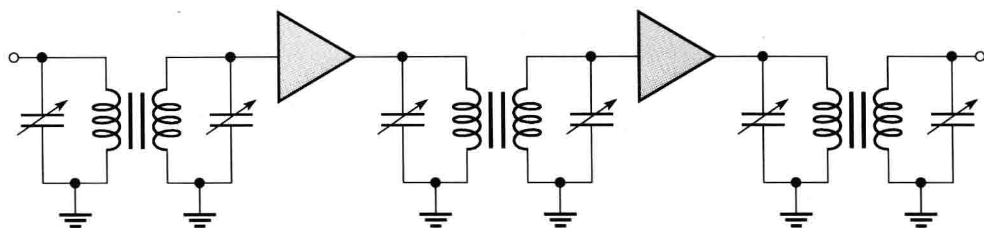


图 13-62　双调谐放大器

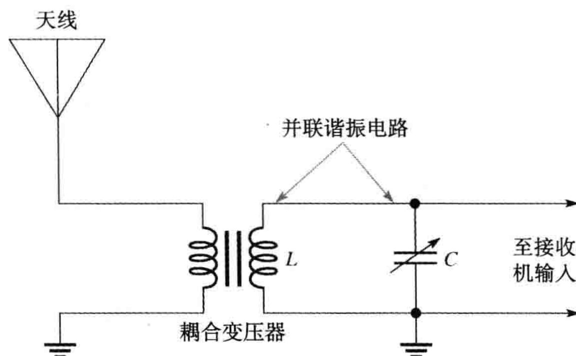


图 13-63　天线的谐振耦合

13.8.4　超外差接收机

谐振电路应用的另一个例子是常用的 AM（调幅）接收机，调幅广播的频带范围从 550kHz 到 1605kHz，在此范围内每个调幅电台分配 10kHz 的带宽[⊖]，调谐电路设计成只允许希望的电台信号通过，而抑制其他电台的信号。为了抑制调谐以外的电台信号，调谐电路必须具有选择性，仅通过 10kHz 带宽内信号而抑制所有其他信号。选择性并非越高越好，如果带宽太窄，一些较高频率的调制信号将被抑制，导致保真度损失。理想情况下，谐振电路必须抑制不在希望通带内的信号。超外差调幅接收机的简化图如图 13-64 所示。

在接收机前端基本上有三个并联谐振电路，各个谐振电路由电容器作联动调整，也就是说，各电容器机械或电子链接在一起，使它们一起改变来选中电台。接收机前端调谐到所需接

⊖ 我国规定的调幅电台带宽为 9kHz。——译者注

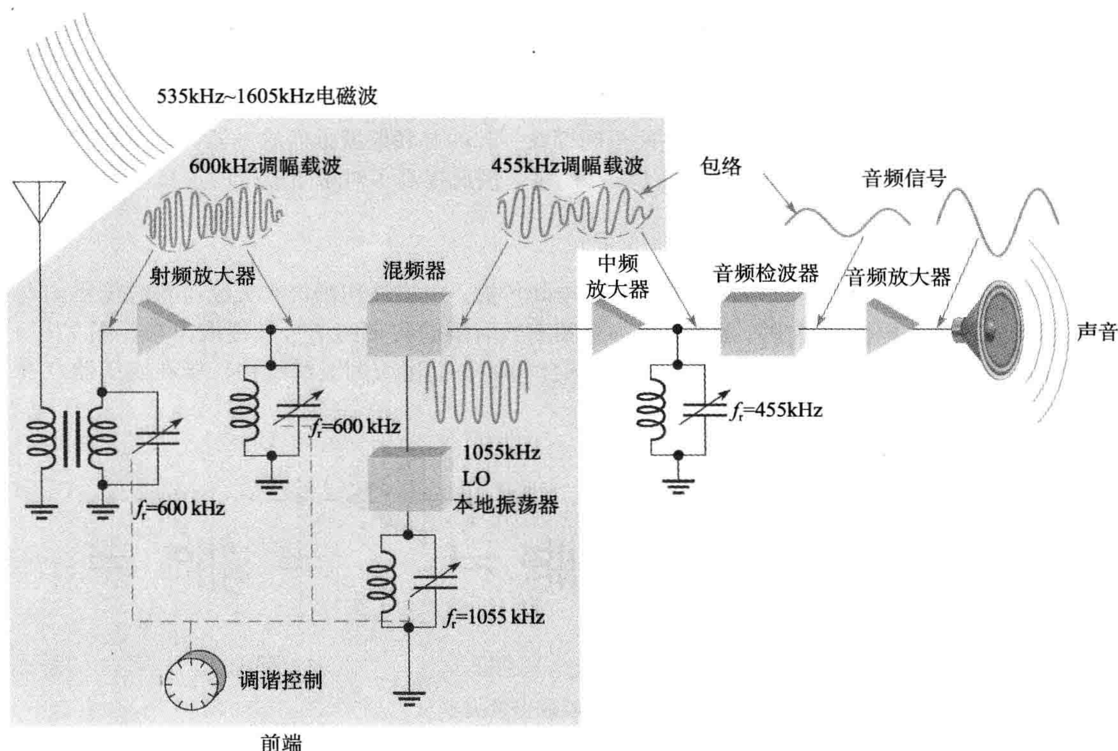


图 13-64 说明调谐谐振电路应用的超外差调幅无线广播接收机简化图

收的电台，如 600kHz，天线的输入谐振电路和 RF（射频）放大器谐振电路只在天线感应的所有频率中选择频率为 600kHz 信号。

实际的音频（声音）信号经调制载波幅度搭载在 600kHz 载波频率上，使载波的幅度随音频信号变化，跟随音频信号改变的载波幅度变化称为包络。600kHz 信号随后被加载到混频器电路。

本地振荡器（LO）调谐在所选择频率以上 455kHz 的频率（本例中为 1055kHz），经过外差或差拍，将调幅信号与本地振荡信号作混频，600kHz 的调幅信号被混频器转换为 455kHz 的调幅信号（1055kHz－600kHz＝455kHz）。

455kHz 是标准调幅接收机的中频（IF），无论被广播频段内的哪个电台被选中，其频率总是先转换为 455kHz 中频，再由调谐在 455kHz 中频的中频放大器对中频调幅信号进行放大，中频放大器的输出加到音频检波器，去除中频而只留下包含音频信号的包络，最后音频信号经过放大加到扬声器。

本节测试题

1. 一般情况下，为什么必须调谐的谐振电路才能将信号从天线耦合到接收器的输入端？
2. 在调幅收音机中使用中频的优点是什么？
3. 试问联动调整是什么意思？

本章小结

- X_L 和 X_C 在 *RLC* 电路中的作用相反。
- 串联 *RLC* 电路中较大的电抗主导电路的净电抗。
- 并联 *RLC* 电路中较小的电抗主导电路的净电抗。

串联谐振

- 电抗相等。
- 阻抗最小且等于电阻。
- 电流最大。
- 相位角为零。
- L 和 C 两端的电压幅度相等，相位相差 180°，因此互相抵消。

并联谐振

- 对于 $Q\geqslant 10$，电抗近似相等。
- 阻抗最大。
- 电流最小，理想情况为零。
- 相位角为零。
- L 和 C 支路的电流大小相等，相位相差 180°，因此互相抵消。
- 带通滤波器允许上、下临界频率之间的频率通过，抑制其他频率。
- 带阻滤波器抑制上、下临界频率之间的频率，允许其他频率通过。
- 谐振滤波器的频带宽度由品质因数（Q）和谐振频率确定。
- 截止频率又称为 −3dB 频率或临界频率。
- 在截止频率，输出电压为最大值的 70.7%。

关键术语

带通滤波器（Band-pass filter） 一种谐振电路，允许落在两个截止频率之间的频率范围通过，而抑制低于或高出该频率范围的频率。

带阻滤波器（Band-stop filter） 一种谐振电路，抑制落在两个截止频率之间的频率范围，而允许低于或高出该频率范围的频率通过。

截止频率（Cutoff frequency，f_c） 滤波器输出电压为其最大输出电压 70.7%的频率。

分贝（dB）（Decibel） 一种对数单位，表示 10 乘以两个功率之比的对数或 20 乘以等值电阻两端两个电压之比的对数。

半功率频率（Half-power frequency） 滤波器的输出功率为最大值 50%（输出电压为最大值 70.7%）的频率，又称为临界频率或截止频率。

并联谐振（Parallel resonance） 并联 RLC 电路中，阻抗最大且电抗相等的状态。

谐振频率（Resonant frequency） 在串联或并联 RLC 电路中发生谐振的频率。

选择性（Selectivity） 谐振电路通过某些频率而抑制其他频率的有效性度量，带宽越窄选择性越好。

串联谐振（Series resonance） 串联 RLC 电路中，阻抗最小且电抗相等的状态。

关键公式

(13-1) $X_{tot}=|X_L-X_C|$ 串联总电抗（绝对值）

(13-2) $Z_{tot}=\sqrt{R^2+X_{tot}^2}$ 串联 RLC 总阻抗

(13-3) $\theta=\arctan\left(\frac{X_{tot}}{R}\right)$ 串联 RLC 的相位角

(13-4) $f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 理想串联谐振频率

(13-5) $BW=f_2-f_1$ 带宽

(13-6) $\text{dB}=10\log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)$ 功率比的分贝公式

(13-7) $\text{dB}=20\log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)$ 电压比的分贝公式

(13-8) $Q=\frac{X_L}{R}$ 串联谐振品质因数

(13-9) $BW=\frac{f_r}{Q}$ 带宽

(13-10) $Y=\sqrt{G^2+B_{tot}^2}$ 并联 RLC 的导纳

(13-11) $\theta=\arctan\left(\frac{B_{tot}}{G}\right)$ 并联 RLC 的相位角

(13-12) $I_{tot}=\sqrt{I_R^2+I_{CL}^2}$ 并联 RLC 的总电流

(13-13) $\theta=\arctan\left(\frac{I_{CL}}{I_R}\right)$ 并联 RLC 的相位角

(13-14) $L_{eq}=L\left(\frac{Q^2+1}{Q^2}\right)$ 等效并联电感

(13-15) $R_{p(eq)}=R_W(Q^2+1)$ 等效并联电阻

(13-16) $f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 理想并联谐振频率

(13-17) $I_{tot}=|I_L-I_C|$ 并联 LC 总电流（绝对值）

(13-18) $I_{tot}=\frac{V_S}{Z_r}$ 并联谐振总电流

(13-19) $f_r=\frac{\sqrt{1-(R_W^2C/L)}}{2\pi\sqrt{LC}}$ 并联谐振频率（精确）

(13-20) $R_{p(tot)}=R_L \parallel R_{p(eq)}$ 并联总电阻

(13-21) $Q_O\approx\frac{R_{p(tot)}}{X_{L(eq)}}$ 并联 RLC 电路的总 Q 值

是非测验题

1. 串联 RLC 电路的电阻两端可能具有比电源电压大的电压。
2. 串联 RLC 电路的阻抗与电源电压有关。
3. 高于谐振频率，串联谐振电路表现为电感性，电流将滞后于电压。
4. 带通滤波器可以由 RLC 电路构成。
5. 并联谐振带阻滤波器在谐振频率的阻抗最小。
6. 带阻滤波器的上、下截止频率决定了带宽。
7. 电感的 Q 值与测量的频率有关。
8. 带通滤波器的 Q 值不影响带宽。
9. 并联 RLC 电路的总阻抗总是大于电阻。
10. 在谐振时并联谐振电路的电流与各个元件中的电流相同。

自测题

1. 谐振时串联 RLC 电路的总电抗为
   (a) 零 (b) 等于电阻
   (c) 无穷大 (d) 电容性
2. 谐振时串联 RLC 电路的相位角是
   (a) $-90°$ (b) $+90°$
   (c) $0°$ (d) 取决于电抗
3. 串联 RLC 电路中 $L=15\text{mH}$、$C=0.015\mu\text{F}$、$R_W=80\Omega$，谐振频率的阻抗为
   (a) $15\text{k}\Omega$ (b) 80Ω
   (c) 30Ω (d) 0Ω
4. 工作在谐振频率以下的串联 RLC 电路，电流
   (a) 与电源电压同相位
   (b) 滞后于电源电压
   (c) 超前于电源电压
5. 如果串联 RLC 电路中 C 的值增大，谐振频率
   (a) 不受影响 (b) 增大
   (c) 保持相同 (d) 减小
6. 某串联谐振电路中，$V_C=150\text{V}$，$V_L=150\text{V}$，$V_R=50\text{V}$，则电源电压为
   (a) 150V (b) 300V
   (c) 50V (d) 350V
7. 某串联谐振带通滤波器带宽为1kHz，如果将现有线圈换成一个低 Q 线圈，则带宽将
   (a) 增大 (b) 减小
   (c) 保持相同 (d) 选择性更好
8. 工作在谐振频率以下的并联 RLC 电路，电流
   (a) 超前于电源电压
   (b) 滞后于电源电压
   (c) 与电源电压同相位
9. 理想情况下，谐振时流进并联电路 L 和 C 支路的总电流为
   (a) 最大 (b) 低
   (c) 高 (d) 零
10. 为了将并联谐振电路调谐在较低频率，应将电容
    (a) 增大 (b) 减小

（c）不管　　（d）换成电感

11. 由相同元件构成的并联电路和串联电路的谐振频率相同的条件是
    （a）Q 值非常低（b）Q 值非常高
    （c）没有电阻

12. 若与并联谐振滤波器并联的电阻减小，则带宽
    （a）消失　　（b）减小
    （c）变尖锐　　（d）增大

习题

基本习题

13.1 节

1. 某串联 RLC 电路工作在 5kHz 频率，具有下列值：$R=10\Omega$、$C=0.047\mu F$、$L=5mH$，求阻抗与相位角，总电抗是多少？
2. 求图 13-65 中的阻抗。
3. 如果图 13-65 中的电源电压频率从产生指示电抗的值加倍，试问阻抗如何变化？

13.2 节

4. 对于图 13-65 中的电路，求 I_{tot}、V_R、V_L 和 V_C。

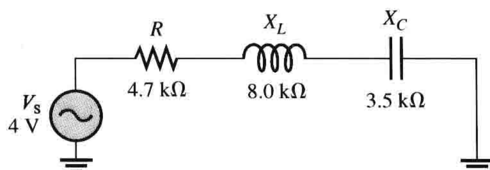


图　13-65

5. 画出图 13-65 中电路的电压相量。
6. 分析图 13-66 中电路的下列值（$f=25kHz$）：
    （a）I_{tot}　　（b）P_{true}
    （c）P_r　　（d）P_a

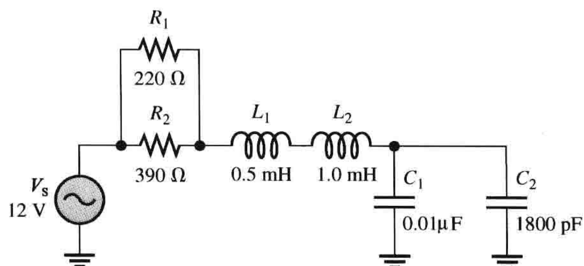


图　13-66

13.3 节

7. 对于图 13-65 中的电路，谐振频率比图中标示电抗指示的值高还是低？
8. 对于图 13-67 中的电路，求谐振时 R 两端的电压。
9. 求图 13-67 中电路谐振时的 X_L、X_C、Z 和 I。
10. 某串联谐振电路的最大电流为 50mA 且 V_L 为 100V，电源电压为 10V，试问 Z 是多少？X_L 和 X_C 是多少？

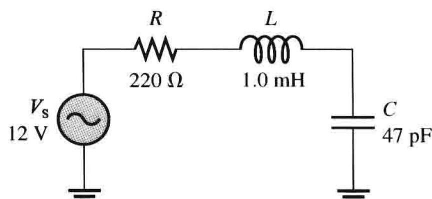


图　13-67

11. 求图 13-68 所示 RLC 电路的谐振频率与截止频率。
12. 试问图 13-68 中半功率点的电流值是多少？

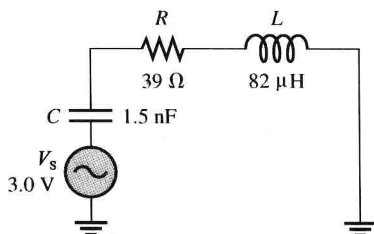
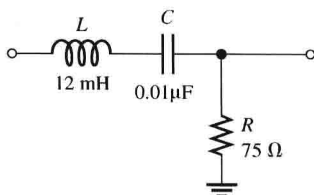


图　13-68

13.4 节

13. 求图 13-69 中各个滤波器的谐振频率，试问它们是带通滤波器还是带阻滤波器？
14. 假设图 13-69 中线圈的线圈电阻为 10Ω，求各个滤波器的带宽。



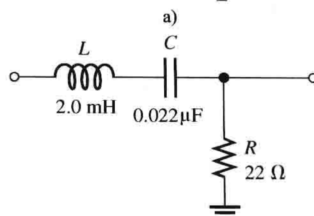


图　13-69

15. 求图 13-70 中各个滤波器的 f_r 和 BW。

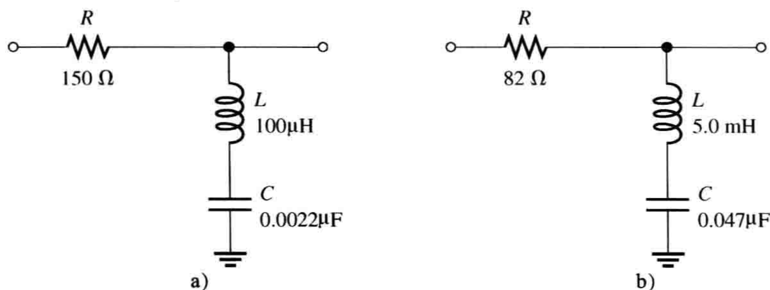


图 13-70

13.5 节

16. 求图 13-71 中电路的总阻抗。

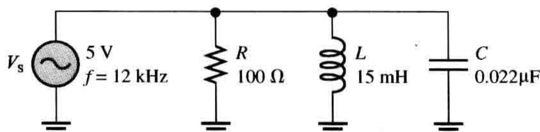


图 13-71

17. 试问图 13-71 中的电路是电容性还是电感性？解释之。
18. 求图 13-71 中电路的所有电流与电压。
19. 求图 13-72 中电路的总阻抗。

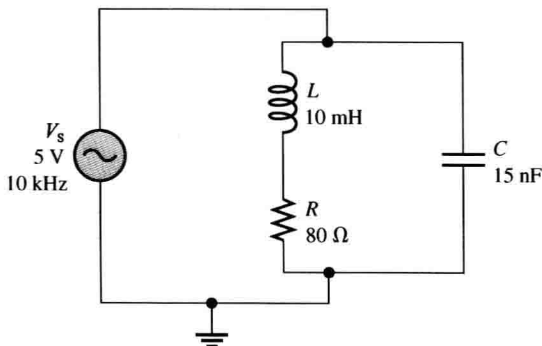


图 13-72

13.6 节

20. 试问理想并联谐振电路的阻抗是多少（两支路均无电阻）？
21. 求图 13-73 中振荡电路谐振时的 Z 和 f_r。
22. 试问谐振时图 13-73 中的电路从电源吸取的电流为多少？在谐振频率电感电流和电容电流是多少？

13.7 节

23. 谐振时并联谐振滤波器的 $X_L = 2\text{k}\Omega$、$R_W = 25\Omega$，谐振频率为 5kHz，求带宽。

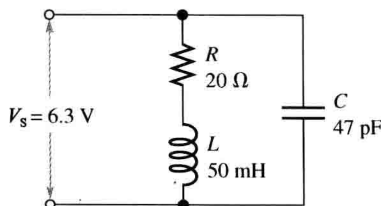


图 13-73

24. 若下截止频率为 2400Hz，上截止频率为 2800Hz，试问带宽是多少？
25. 某谐振电路中，谐振时传输给负载的功率为 2.75W，试问上、下截止频率时的功率是多少？
26. 为了得到 8kHz 的谐振频率，带宽必须为 800Hz，线圈的线圈电阻为 10Ω，试问振荡电路的 L 和 C 应取什么值？
27. 并联谐振电路的 Q 值为 50，BW 为 400Hz，如果 Q 值加倍，试问同样 f_r 对应的带宽是多少？
28. 并联谐振带阻滤波器需要抑制 60Hz 的电源噪声，如果电容为 200μF，试问应该用多大的电感？
29. 如果输出从 220Ω 电阻两端取，试画出习题 28 所述电路。

高级习题

30. 对下列情况用分贝表示电压比：
    (a) $V_{in}=1\text{V}$，$V_{out}=1\text{V}$
    (b) $V_{in}=5\text{V}$，$V_{out}=3\text{V}$
    (c) $V_{in}=10\text{V}$，$V_{out}=7.07\text{V}$
    (d) $V_{in}=25\text{V}$，$V_{out}=5\text{V}$
31. 求图 13-74 中流过每个元件的电流及各元件两端的电压。
32. 确定图 13-75 中是否存在一个 C 值使得 $V_{ab}=0\text{V}$，如果不存在，请给出解释。

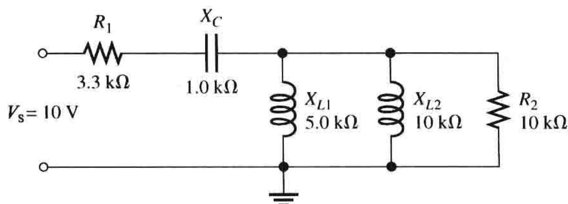


图 13-74

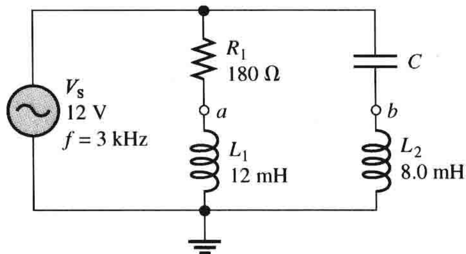


图 13-75

33. 在图 13-75 中如果 C 的值为 0.22μF，试问流过每条支路的电流有多大？总电流是多少？
34. (a) 求图 13-52 所示的电路中振荡器—1 的频率，假设 L_1 为 300μH。
    (b) 试问图 13-52 中低通滤波器的截止频率是多少？
35. 用并联谐振电路设计一个满足下列指标的带通滤波器：$BW = 500\text{Hz}$、$Q = 40$、$I_{C(\max)} = 20\text{mA}$、$V_{C(\max)} = 2.5\text{V}$。
36. 设计一个电路，用开关可选择下列串联谐振频率：500kHz、1000kHz、1500kHz、2000kHz。
37. 用一个线圈和开关可选电容器设计一个并联谐振网络，产生下列谐振频率：8MHz、9MHz、10MHz、11MHz。假设 10μH 线圈的线圈电阻为 5Ω。

Multisim 仿真故障排除习题

38. 打开文件 P13-38，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
39. 打开文件 P13-39，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
40. 打开文件 P13-40，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
41. 打开文件 P13-41，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
42. 打开文件 P13-42，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。
43. 打开文件 P13-43，确定是否存在故障，如果有，请识别故障。

各节测试题答案

13.1 节

1. 如果 $X_L > X_C$，电路为电感性；如果 $X_C > X_L$，电路为电容性。
2. $X_{tot} = |X_L - X_C| = 70\Omega$；电路为电容性。
3. $Z = \sqrt{R^2 + X_{tot}^2} = 83.2\Omega$；
   $\theta = \arctan(X_{tot}/R) = 57.3°$；电流超前于 V_S。

13.2 节

1. $Z = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} = 38.4\text{V}$
2. 由于电路是电容性的，所以电流超前于 V_S。
3. $X_{tot} = |X_L - X_C| = 6\text{k}\Omega$

13.3 节

1. 当 $X_L = X_C$ 时发生串联谐振。
2. 因为阻抗最小，所以电流最大。
3. $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 159\text{kHz}$
4. 因为 $X_C > X_L$，所以是电容性的。

13.4 节

1. $V_{out} = 0.707 \times 15\text{V} = 10.6\text{V}$
2. $BW = f_r/Q = 10\text{kHz}$
3. 电流最大；输出电压最小。

13.5 节

1. $I_R = V_S/R = 8.0\text{mA}$；$I_C = V_S/X_C = 12.0\text{mA}$；$I_L = V_S/X_L = 24.0\text{mA}$
2. 电路为电感性（$X_C > X_L$）。
3. $L_{eq} = L\,[(Q^2+1)/Q^2] = 20.1\text{mH}$；$R_{p(eq)} = R_W\,(Q^2+1) = 1589\Omega$

13.6 节

1. 阻抗最大。
2. 电流最小。
3. 在理想并联谐振时，$X_C = X_L = 1.5\text{k}\Omega$。
4. $f_r = \sqrt{1-(R_W^2C/L)}/2\pi\sqrt{LC} = 33.7\text{kHz}$；
   $Z_r = R_W\,(Q^2+1) = 440\Omega$。
5. $f_r = 1/(2\pi\sqrt{LC}) = 22.5\text{kHz}$
6. $f_r = \sqrt{Q^2/(Q^2+1)}/2\pi\sqrt{LC} = 20.9\text{kHz}$
7. $Z_r = R_W\,(Q^2+1) = 8.02\text{k}\Omega$

13.7 节

1. 减小并联电阻可展宽频带。
2. f_r变为 4.47kHz。

3. $Z_r = R_W(Q^2 + 1) = 47.0\text{k}\Omega$

13.8 节

1. 调谐的谐振电路用来选择窄带频率。
2. 不管选择什么电台都使用同样的调谐电路。
3. 利用一个公共控制同时改变多个可调电容（或电感）的值是联动调整的一个例子。

例题中相关问题答案

例 13-1　1.25kΩ；63.4°

例 13-2　4.71kΩ

例 13-3　电流增大，谐振时达到最大，然后减小

例 13-4　更倾向于电容性

例 13-5　67.3kHz

例 13-6　2.27mA

例 13-7　Z 增大；Z 减小

例 13-8　不会

例 13-9　200kHz

例 13-10　－14dB

例 13-11　7.48

例 13-12　322Hz

例 13-13　V_{out}增大；V_{out}增大

例 13-14　电感性

例 13-15　总电流增大，因 X_C将减小并趋于 0

例 13-16　$R_{p(eq)}=25\text{k}\Omega$；$L_{eq}=5\text{mH}$；$C=0.022\mu\text{F}$，$R_{p(tot)}=4.24\text{k}\Omega$

例 13-17　$I_L=0.996\text{mA}$，$I_C=1.06\text{mA}$

例 13-18　80.0kΩ

例 13-19　差别可忽略

例 13-20　7.07V

例 13-21　530kHz

例 13-22　25

例 13-23　大阻值的负载电阻对 Q_O的影响小

例 13-24　185mV

是非测验题答案

1. T　2. F　3. T　4. T　5. F　6. T　7. T　8. F　9. F　10. F

自测题答案

1. (a)　2. (c)　3. (b)　4. (c)　5. (d)　6. (c)　7. (a)　8. (b)　9. (d)　10. (a)　11. (b)　12. (d)

第14章
变压器

本章目标

- 说明互感
- 描述变压器的构造与工作原理
- 描述变压器的升压和降压
- 讨论二次绕组跨接电阻负载的影响
- 讨论变压器中反映负载的概念
- 讨论用变压器实现阻抗匹配
- 说明实际变压器的额定值
- 描述几种变压器
- 排除变压器故障

第11章我们学习了自感，本章介绍互感，互感是变压器的工作基础。变压器是一种在很多系统中应用的重要部件，例如电源、配电、通信系统的信号耦合。

变压器的工作基于互感原理，当两个或多个线圈放在一起时将产生互感效应。简单的变压器实际上就是两个通过互感电磁耦合的线圈，两个磁耦合的线圈之间没有电气接触，实现了在完全电气绝缘的情况下从一个线圈到另一个线圈的能量传输。在与变压器相关的讨论中，常用术语绕组或线圈描述变压器的一次绕组或二次绕组。

14.1 互感

当两个线圈放在一起时，由于两个线圈之间的互感，其中一个线圈中电流产生的变化磁场将在另一个线圈中感应出电压。

学习完本节内容，应该能够

- 说明互感；
- 讨论磁耦合；
- 定义电气绝缘；
- 定义耦合系数；
- 确定影响互感的因素并说明公式。

我们已经知道，线圈周围的电磁场随着电流的增大、减小与反转而增强、减弱与反转，当第二个线圈与第一个线圈放置得非常接近时，第一个线圈产生的变化的磁力线通过第二个线圈，两个线圈存在磁耦合，将感应出电压，如图14-1所示。

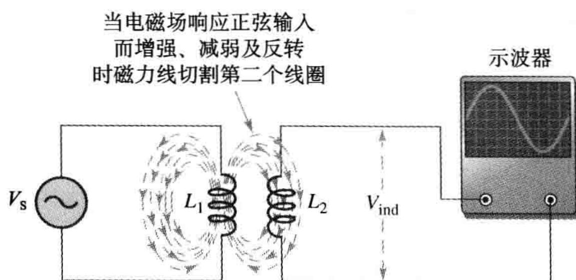


图14-1 第一个线圈中电流变化产生的变化磁场与第二个线圈交链从而第二个线圈感应出电压

当两个线圈存在磁耦合时，除了磁场的交链，两线圈之间没有电气连接，提供了电气绝缘。**电气绝缘**是一种两个电路之间没有公共导电通路的状态。如果第一个线圈中的电流是正弦波，则在第二个线圈中感应出的电压同样是正弦波。由于第一个线圈中的电流在第二个线圈中感应出的电压大小与**互感**（L_M）相关。

互感由各线圈的电感（L_1和L_2）及两个线圈之间的耦合量（k）确定。为了最大限度地提高耦合，这两个线圈绕在公共磁心上。影响互感的三个因素（k、L_1、L_2）如图14-2所示。互感的公式是

$$L_M = k\sqrt{L_1 L_2} \tag{14-1}$$

耦合系数

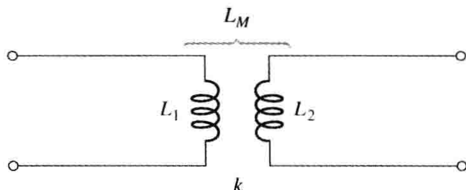


图 14-2 两个线圈的互感

变压器两个线圈之间的耦合系数 k 是线圈1产生的在线圈2交链的磁通（磁力线数，ϕ_{1-2}）与线圈1产生的总磁通（ϕ_1）之比。

$$k=\frac{\phi_{1-2}}{\phi_1} \tag{14-2}$$

例如，如果线圈1产生的磁通有一半与线圈2交链，则 $k=0.5$。耦合系数 k 越大，意味着对于线圈1中一定的电流变化率在线圈2中感应的电压越大。注意 k 没有单位，而磁力线（磁通）的单位是韦伯，简记为 Wb。

耦合系数 k 的大小取决于两个线圈的物理邻近程度及所用的磁心材料种类，还与磁心的结构和形状有关。

【例 14-1】 两个线圈绕在同一个磁心上，耦合系数为0.3，线圈1的电感为 $10\mu\text{H}$，线圈2的电感为 $15\mu\text{H}$，试问 L_M 是多少？

解： $L_M=k\sqrt{L_1L_2}=0.3\sqrt{10\mu\text{H}\times15\mu\text{H}}=3.67\mu\text{H}$

相关问题：当 $k=0.5$、$L_1=1\text{mH}$、$L_2=600\mu\text{H}$ 时，求互感。

【例 14-2】 一个线圈产生的总磁通为 $50\mu\text{Wb}$，其中有 $20\mu\text{Wb}$ 磁通与线圈2交链，试问 k 是多少？

解： $k=\frac{\phi_{1-2}}{\phi_1}=\frac{20\mu\text{Wb}}{50\mu\text{Wb}}=0.4$

相关问题：当 $\phi_1=500\mu\text{Wb}$、$\phi_{1-2}=375\mu\text{Wb}$ 时，求 k。

本节测试题

1. 请给出互感的定义。
2. 两个 50mH 的线圈具有 $k=0.9$，试问 L_M 是多少？
3. 如果 k 增大，一个线圈中电流的变化在另一个线圈中感应的电压会发生什么变化？

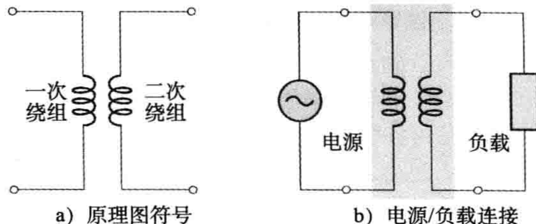
14.2 基本变压器

变压器是由相互电磁耦合的两个或两个以上绕组构成的电气设备，绕组之间存在互感使得功率可以从一个绕组传输到另一个绕组。虽然许多变压器有两个以上的绕组，但我们本节的讨论将只限于基本的双绕组变压器。稍后介绍一些复杂的变压器。

学习完本节内容，应该能够

- 描述变压器的构造与工作原理；
- 识别基本变压器的各个部分；
- 讨论磁心材料的重要性；
- 定义一次绕组和二次绕组；
- 定义匝数比；
- 讨论绕组方向对电压极性的影响。

变压器的电路原理图如图14-3a所示，其中一个线圈称为一次绕组，另一个线圈称为二次绕组，如图中标记。标准工作情况下，电源电压在一次绕组加入，负载则接在二次绕组，如图14-3b所示。一次绕组为输入绕组，二次绕组为输出绕组。通常将变压器接电源电压的一边作为一次绕组，而感应电压的一边作为二



a）原理图符号　b）电源/负载连接

图 14-3 基本变压器

次绕组。

变压器的绕组绕在磁心上，磁心不仅为绕组提供放置的物理结构，还为绕组提供磁路使磁通集中在线圈中。常用的三类磁心材料为空气、铁氧体和铁。各种类型的电路符号如图 14-4 所示。

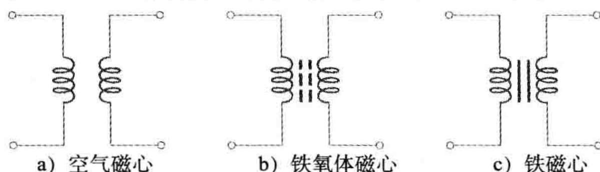


图 14-4 特定种类磁心变压器的电路原理图符号

铁心变压器一般用于音频和大功率应用中，这种变压器的铁心由彼此绝缘的铁磁材料片叠压构成，如图 14-5 所示。这种结构提供了便捷的磁通路径，增大了绕组之间的耦合。图中显示了两种铁心变压器的基本结构。在图 14-5a 的心型结构中，绕组分别绕在层叠铁心的一个柱上。图 14-5b 所示的壳型结构中，两个绕组绕在同一柱上。两种类型各有优势。一般情况下，心型的绝缘空间大可以处理更高的电压，而壳型则可产生更大的磁心磁通量，所以需要匝数较少。

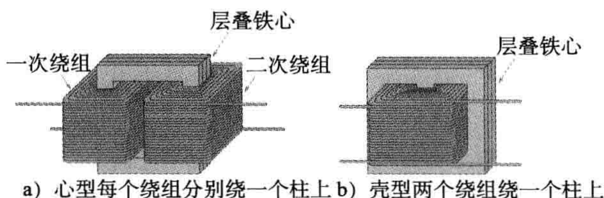


图 14-5 含多层绕组的铁心变压器结构

空气磁心和铁氧体磁心变压器一般用于高频，绕组绕在空心（空气）或铁氧体构成的绝缘壳上，如图 14-6 所示。导线通常由清漆涂层覆盖以防止绕组间短路，一次绕组和二次绕组之间的磁耦合量由磁心材料的类型和绕组的相对位置设定。在图 14-6a 中，两绕组分开故耦合较松，而图 14-6b 中两个绕组重叠故耦合较紧，耦合越紧，给定一次电流在二次绕组产生的感应电压越大。另一个常用的高频变压器是中频（IF）变压器，如图 14-6c 所示，其中的铁氧体磁心可用螺钉调节使变压器调谐在特定频率。

高频变压器比功率变压器的绕组少，电感量小。近年来，流行一种高频变压器：平面变压器。典型的平面变压器如图 14-7a 所示，平面变压器由印制电路板组装方法（而不是导线绕）构造，因而能够高精度、成本低生产。绕组实际上是堆叠印制电路板的布线。平面变压器可做成各种尺寸和功率额定值。由于平面变压器的尺寸小（通常小于 0.5in），特别适合空间位置至关重要的场合。图 14-7b显示了常用于电源的低压变压器。图 14-7c 和图 14-7d 显示了其他类型的常见小型变压器。

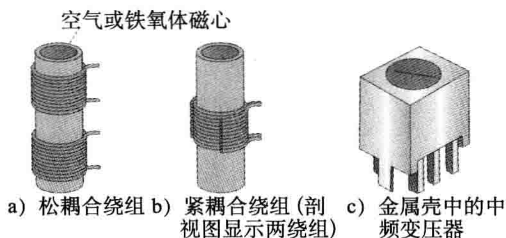


图 14-6 柱形磁心变压器

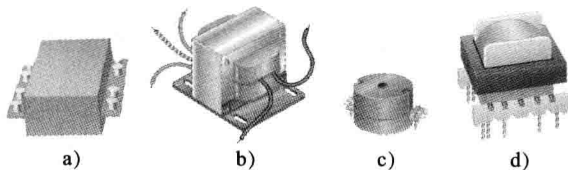
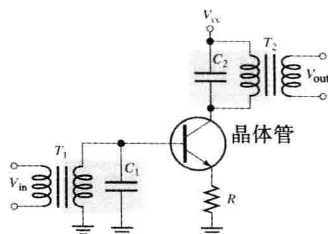


图 14-7 一些常见的变压器

系统注释 中频变压器

通信系统和某些测量系统使用调谐变压器将高频信号从一级耦合到下一级，信号一般为称为中频（IF）的预先确定的频率，该频率是一个系统中使用的固定的频率。此处显示的晶体管电路是带有并联谐振调谐电路的中频放大器，谐振电路显示在框内，输入端为 C_1 和 T_1 的二次绕组，输出端为 C_2 和 T_2 的一次绕



组，这使得放大器有选择地放大中频。

14.2.1 匝数比

匝数比是一个在理解变压器工作原理时的很有用的参数，本书的匝数比（n）定义为二次绕组的匝数（N_{sec}）与一次绕组的匝数（N_{pri}）之比。

$$n = \frac{N_{sec}}{N_{pri}} \tag{14-3}$$

匝数比的这个定义基于 IEEE 关于电子功率变压器的标准，由 IEEE 字典指定。其他类型的变压器可能有不同的定义，因此有些定义匝数比为 N_{pri}/N_{sec}。无论哪种定义，只要表述清楚并且使用一致，都是正确的。在变压器规格中很少使用匝数比，通常，输入、输出电压和额定功率是变压器的主要规格，然而，匝数比对研究变压器的工作原理是有用的。

【例 14-3】 某用于雷达系统的变压器一次绕组为 100 匝，二次绕组为 400 匝，试问其匝数比是多少？

解： $N_{sec}=400$，$N_{pri}=100$，因此匝数比为

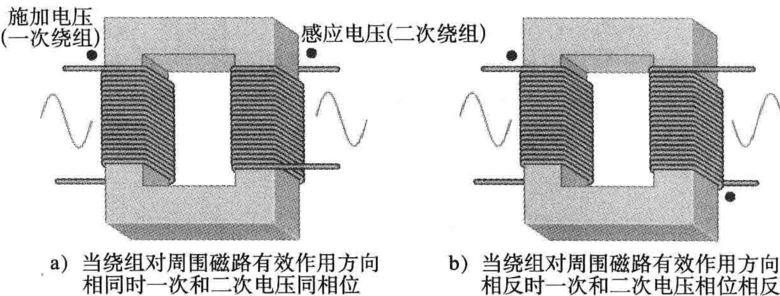
$$n = \frac{N_{sec}}{N_{pri}} = \frac{400}{100} = 4$$

匝数比 4 在电路图上可以表示为 1∶4。

相关问题：某变压器的匝数比为 10，如果已知 $N_{pri}=500$，试问 N_{sec} 是多少？

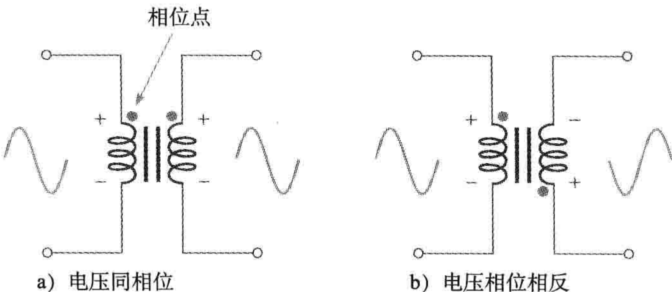
14.2.2 绕组方向

另一个变压器的重要参数是绕组在磁心上的缠绕方向，如图 14-8 所示，绕组方向决定了二次绕组两端电压（二次电压）相对于一次绕组两端电压（一次电压）的极性，原理图符号用相位点来表示极性，如图 14-9 所示。



a）当绕组对周围磁路有效作用方向相同时一次和二次电压同相位　b）当绕组对周围磁路有效作用方向相反时一次和二次电压相位相反

图 14-8 绕组方向决定电压的相对极性



a）电压同相位　b）电压相位相反

图 14-9 相位点指示一次、二次电压的对应极性

本节测试题

1. 试问变压器工作是基于什么原理？
2. 请给出匝数比的定义。
3. 变压器绕组的方向为什么重要？
4. 某变压器一次绕组为 500 匝，二次绕组为 250 匝，试问其匝数比是多少？
5. 试问平面变压器的绕组与其他变压器有何不同？

14.3　升压与降压变压器

升压变压器的二次绕组匝数比一次绕组多，用于提升交流电压，而降压变压器的一次绕组匝数比二次绕组多，用于降低交流电压。

学习完本节内容，应该能够

- 描述变压器的升压和降压过程；
- 说明升压变压器的工作原理；
- 根据匝数比识别升压变压器；
- 表述一次、二次电压与匝数比的关系；
- 说明降压变压器的工作原理；
- 根据匝数比识别降压变压器；
- 说明交流线路调节的目的。

14.3.1　升压变压器

二次电压大于一次电压的变压器称为**升压变压器**，电压提升量取决于匝数比。对于任意变压器，有：二次电压（V_{sec}）与一次电压（V_{pri}）之比等于二次绕组匝数（N_{sec}）与一次绕组匝数（N_{pri}）之比。

$$\frac{V_{sec}}{V_{pri}}=\frac{N_{sec}}{N_{pri}} \tag{14-4}$$

N_{sec}/N_{pri}定义为匝数比 n，因此，根据这个关系 V_{sec}可表示为

$$V_{sec}=nV_{pri} \tag{14-5}$$

式（14-5）说明二次电压等于匝数比乘以一次电压。这一条件假设耦合系数为 1，好的铁心变压器能接近这个值。

升压变压器的匝数比总是大于 1，因为二次绕组的匝数（N_{sec}）总是大于一次绕组的匝数（N_{pri}）。

【例 14-4】　图 14-10 中变压器匝数比为 3，试问二次绕组两端的电压是多少？如无其他说明电压均为有效值。

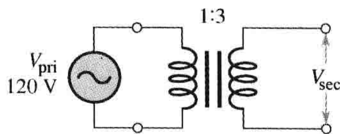


图　14-10

解： 二次电压为

$$V_{sec}=nV_{pri}=3\times120\text{V}=360\text{V}$$

相关问题：将图 14-10 中的变压器改为匝数比 4 的变压器，求 V_{sec}。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E14-04，测量二次电压。

14.3.2　降压变压器

二次电压小于一次电压的变压器称为**降压变压器**，电压下降量取决于匝数比。公式（14-5）同样可用于降压变压器。

由于二次绕组的匝数（N_{sec}）总是小于一次绕组的匝数（N_{pri}），所以降压变压器的匝数比总是小于 1。

【例 14-5】 图 14-11 中变压器是实验室电源的一部分，匝数比为 0.2，试问二次电压是多少？

解： 二次电压为

$$V_{sec} = nV_{pri} = 0.2 \times 120V = 24V$$

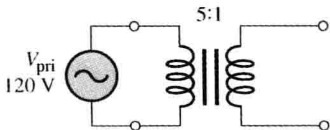


图 14-11

相关问题：将图 14-11 中的变压器改为匝数比为 0.48 的变压器，求二次电压。

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E14-05 并测量二次电压。

系统举例 14-1 简单电源

变压器最重要的应用之一是在电源中。几乎在所有电子系统中都需要电源将交流电转换为直流电。首先使用变压器将交流电转换为较高或较低的电压值，然后将交流电转变成脉动直流，接着再对其进行平滑，最后作稳压。许多系统的控制电路使用低压直流供电。

一个简单电源如图 14-12 所示，在宽范围负载及线路电压变化下提供恒定的 5V 直流输出。该电源使用集成稳压器 7805，检测输出并与参考值比较，对输出进行调节使之保持恒定。稳压器 7805 设计成输出正 5.0V 电压。

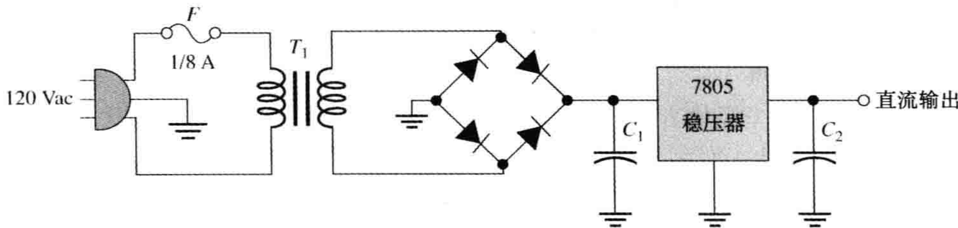


图 14-12 简单 5.0V 直流电源

电源的工作工程如下：插头插入墙壁插座，接上 120V 交流电，通过串联熔断器进入变压器的输入端，熔断器的额定电流比最大输出电流小很多，这是因为变压器降低电压却提升电流。对于这里的简单电源，变压器输出有效值大约为 6V（峰值为 8.5V），4 个二极管接成桥式结构，将交流电压转换为脉动直流，通过 C_1 进行平滑，稳压器 7805 提供附加的平滑并保持输出近似恒定，最后由 C_2 提供平滑和滤波。

使用任何电源，必须清楚当电路接到交流电时存在危险电压。当电源连接到交流电时，即使是低压电源也可能是致命的。高压电源的情况下更应格外小心，甚至在电路断电时仍然是危险的，因为电容器可保留很大充电量。操作电压源和高能量源（如电池）的安全注意事项已在 1.8 节进行了讨论，应始终牢记。

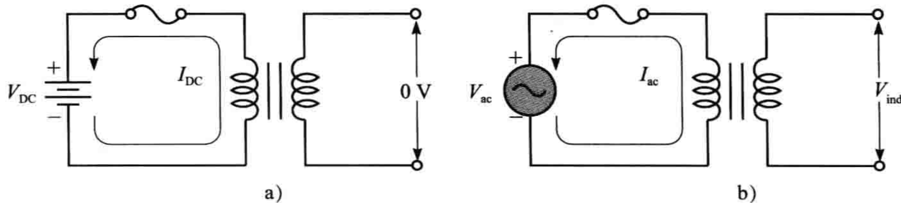


图 14-13

14.3.3 直流隔离

如果在变压器一次电路中流过直流电流，对二次电路中不会产生任何作用，如图 14-13a 所示。为了产生变化的磁场，一次绕组中必须流过变化的电流，从而在二次电路中感应出电

压，如图 14-13b 所示。因此，变压器的一次电路与二次电路是直流隔离的，严格用于直流隔离的变压器匝数比为 1。

隔离变压器常封装成总交流线路调节器件的一部分，线路调节除了隔离变压器，还包括浪涌保护器、消除干扰的滤波器，有时还带有自动电压调节。线路调节在隔离敏感设备中是非常有用的，如以微处理器为基础的控制器。医院病人监控设备的专用线路调节器能提供高度的电气隔离，防止电击。

用于两级放大器之间直流隔离的小型变压器称为耦合变压器，它们让信号通过（“耦合”）而隔断直流，耦合变压器广泛用于高频电路中，通过将一次绕组和二次绕组作为并联谐振电路（谐振电路已在第 13 章讨论）的一部分使得只允许选择的频带信号通过。典型的耦合变压器连接如图 14-14 所示，其中变压器是输入、输出谐振电路的一部分，通常耦合变压器的磁心可以调节，以微调电路的频率响应。在音频情况，耦合变压器主要用于从放大器到扬声器的信号耦合，以提供最大功率传输，这种变压器又称为阻抗匹配变压器（将在 14.6 节讨论）。

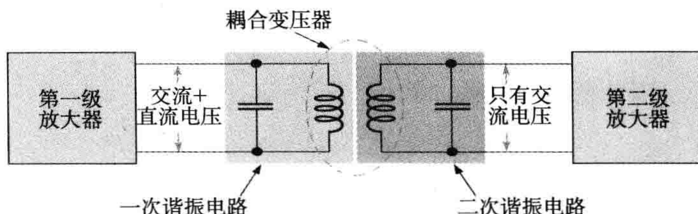


图 14-14　耦合变压器传输谐振电路确定频带的高频信号，而直流不会传递到下一级

本节测试题

1. 试问升压变压器的作用是什么？
2. 如果匝数比是 5，试问二次电压比一次电压大多少？
3. 当 240V 交流电压加到匝数比为 10 的变压器，试问二次电压是多少？
4. 试问降压变压器的作用是什么？
5. 120V 交流电压加到匝数比 0.5 的变压器一次绕组，试问二次电压是多少？
6. 原边 120V 交流电压被降为 12V 交流电压，试问变压器匝数比是多少？
7. 试问交流线路调节器的典型特征是什么？

14.4　二次绕组加负载

当变压器二次绕组接电阻负载时，负载电流（二次侧）和一次电路电流之间的关系由匝数比决定。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论二次绕组两端电阻负载的影响；
- 讨论变压器中的功率；
- 确定升压变压器加负载时二次绕组流出的电流；
- 确定降压变压器加负载时二次绕组流出的电流。

变压器空载工作时，一次绕组表现为一个电感，理想情况下，电感中电流将滞后于电压 90°且功率因数为 0。当变压器二次绕组接上一个电阻负载时，变压器一次绕组将不再表现为理想电感，相位角减小而功率因数增大。一次电流与电压将近似同相位，所以负载使得一次绕组更似电阻性。为了讨论方便，我们将假设负载为电阻负载的理想情况。

传输给负载的功率不可能大于电源提供给一次绕组的功率。对于理想变压器，二次绕组提供的功率（P_{sec}）等于电源提供给一次绕组的功率（P_{pri}）。考虑损耗时，二次绕组提供的功率总是小于一次功率。

功率由电压和电流决定，变压器中不可能增大功率，因此，如果电压升高，则电流必然降

低，反之亦然。理想变压器二次绕组提供给负载的功率与电源提供给一次绕组的功率相同，与匝数比无关。

电源提供给一次绕组的功率为

$$P_{pri} = V_{pri} I_{pri}$$

二次绕组提供的功率为

$$P_{sec} = V_{sec} I_{sec}$$

理想情况 $P_{pri} = P_{sec}$，因此

$$V_{pri} I_{pri} = V_{sec} I_{sec}$$

等式两边交换项，得

$$\frac{I_{pri}}{I_{sec}} = \frac{V_{sec}}{V_{pri}}$$

由式（14-4），得

$$\frac{V_{sec}}{V_{pri}} = \frac{N_{sec}}{N_{pri}}$$

由于 N_{sec}/N_{pri} 为匝数比 n，因此变压器一次电流与二次电流之间的关系为

$$\frac{I_{pri}}{I_{sec}} = n \tag{14-6}$$

公式（14-6）两边取倒数，解 I_{sec}

$$I_{sec} = \left(\frac{1}{n}\right) I_{pri} \tag{14-7}$$

图 14-15 演示了变压器中电压和电流的影响，图 14-15a 的升压变压器中，n 大于 1，由于 $1/n$ 小于 1，因此二次电流小于一次电流。图 14-15b 所示的降压变压器中，n 小于 1，由于 $1/n$ 大于 1，因此 I_{sec} 大于 I_{pri}。

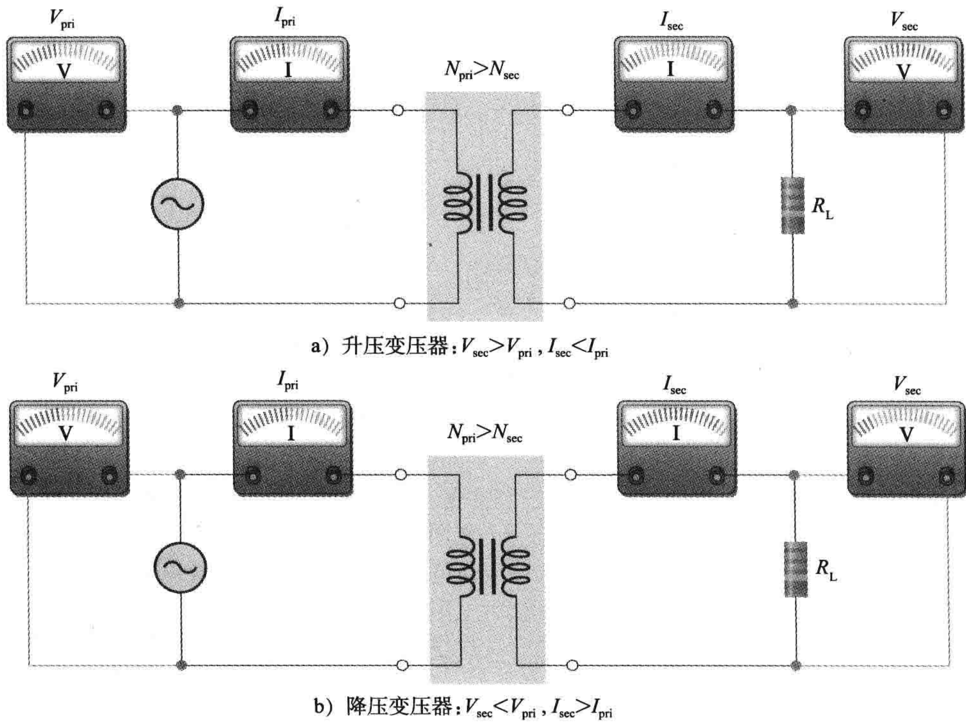
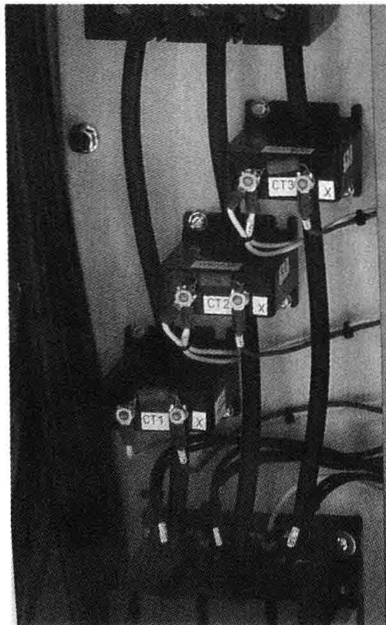


图 14-15 二次绕组加负载时变压器中电压与电流的演示

系统注释：电流互感器

电流互感器的工作就像一个变压器，通过感应将能量从一次绕组传输二次绕组。电流互感器常用于感测和监测大的交变电流，而无需断开线路进行测量。常见的应用是监测三相或大容量单相客户的电流并提供结果到电度表。

使用电流互感器的一个重要考虑因素是，当一次绕组有电流时，负载不能断开。如果发生这种情况，突然断路会在二次绕组产生很高的电压，引起电弧并可能永久损坏变压器及所连接的设备。此外，工作人员也有触电的危险。



图片由 Thomas Kissell 提供

【例 14-6】 如图 14-16 所示的两个理想变压器二次绕组带负载，若二次绕组负载导致两个电路一次电流都为 100mA，试问流过负载的电流是多少？

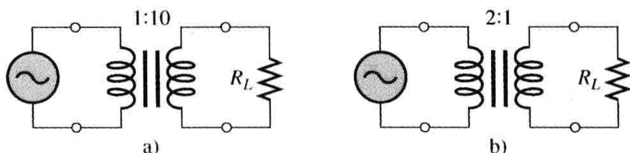


图 14-16

解： 图 14-16a 中匝数比为 10，因此二次绕组负载电流为

$$I_L = I_{sec} = \left(\frac{1}{n}\right)I_{pri} = \left(\frac{1}{10}\right)I_{pri} = 0.1 \times 100\text{mA} = 10\text{mA}$$

图 14-16b 中匝数比为 0.5，因此二次绕组负载电流为

$$I_L = I_{sec} = \left(\frac{1}{n}\right)I_{pri} = \left(\frac{1}{0.5}\right)I_{pri} = 2 \times 100\text{mA} = 200\text{mA}$$

相关问题：若图 14-16a 中变压器的匝数比加倍，试问二次电流是多少？若图 14-16b 中变压器的匝数比减半，试问二次电流是多少？假设通过改变负载电阻使得 I_{pri} 在两种情况下都保持 100mA。

本节测试题

1. 如果变压器的匝数比为 2，试问二次电流比一次电流大还是小？差多少？
2. 变压器一次绕组匝数为 1000，二次绕组匝数为 250，I_{pri} 为 0.5A，试问匝数比是多少？I_{sec} 的值是多少？
3. 在问题 2 中，当二次绕组负载电流为 10A 时一次电流是多少？
4. 当电流互感器一次绕组有电流时，为什么断开负载是不安全的？

14.5 反映负载

从一次绕组来看，接在变压器二次绕组的负载表现为在一次绕组接了一个与实际负载电阻值不相等的电阻。实际负载按匝数比确定的值“反映”到一次绕组，反映负载是电源实际所见到的负载，它决定了一次电流。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论变压器中反映负载的概念；
- 定义反映电阻；
- 说明匝数比对反映电阻的影响；
- 计算反映电阻。

反映负载的概念如图14-17所示，变压器二次绕组的负载（R_L）通过变压器作用反映入一次绕组，理想情况下，对一次绕组电源所呈现的负载为一个电阻（R_{pri}），其阻值由匝数比和实际负载电阻值确定。电阻R_{pri}称为反映电阻。

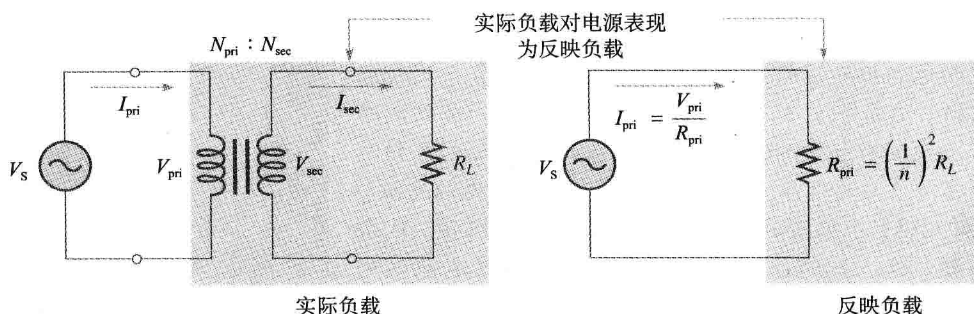


图14-17 变压器电路中的反映负载

图14-17中一次绕组的电阻为$R_{pri}=V_{pri}/I_{pri}$，而二次绕组的电阻为$R_L=V_{sec}/I_{sec}$。由式（14-4)和式（14-6）我们知道，$V_{sec}/V_{pri}=n$，$I_{pri}/I_{sec}=n$，利用这些关系，由R_L确定R_{pri}的公式如下：

$$\frac{R_{pri}}{R_L}=\frac{V_{pri}/I_{pri}}{V_{sec}/I_{sec}}=\left(\frac{V_{pri}}{V_{sec}}\right)\left(\frac{I_{sec}}{I_{pri}}\right)=\left(\frac{1}{n}\right)\left(\frac{1}{n}\right)=\left(\frac{1}{n}\right)^2$$

解R_{pri}得

$$R_{pri}=\left(\frac{1}{n}\right)^2R_L \tag{14-8}$$

公式（14-8）表明反映到一次绕组的电阻为匝数比倒数的平方乘以负载电阻。

升压变压器（$n>1$）中，反映电阻小于实际负载电阻，而降压变压器（$n<1$）中，反映电阻大于负载电阻。例14-7和例14-8分别说明了这两种情况。

【例14-7】 图14-18表示电源通过变压器耦合到100Ω负载电阻，变压器的匝数比为4，试问电源所见的反映电阻是多少？

解： 反映电阻为

$$R_{pri}=\left(\frac{1}{n}\right)^2R_L=\left(\frac{1}{4}\right)^2\times100\Omega=\frac{1}{16}\times100\Omega=6.25\Omega$$

电源所见的电阻就如同直接接6.25Ω电阻，等效电路如图14-19所示。

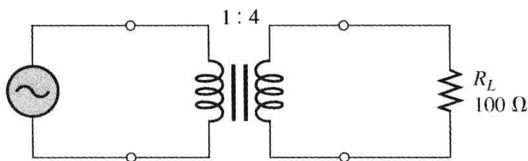


图 14-18

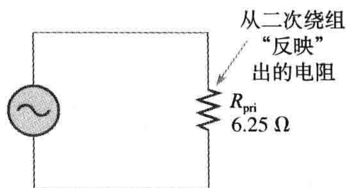


图 14-19

相关问题：如果图14-18中的匝数比为10，R_L为600Ω，试问反映电阻是多少？

【例14-8】 在图14-18中，如果使用匝数比为0.25的变压器，试问反映电阻是多少？

解： 反映电阻为

$$R_{pri}=\left(\frac{1}{n}\right)^2R_L=\left(\frac{1}{0.25}\right)^2\times100\Omega=4^2\times100\Omega=1600\Omega$$

相关问题：为了得到 800Ω 的反映电阻，试问在图 14-18 中需要多大的匝数比？

本节测试题

1. 请定义反映电阻。
2. 试问变压器的什么特性确定反映电阻？
3. 给定变压器匝数比为 10，负载为 50Ω，试问反映到一次绕组的电阻是多少？
4. 试问将 4Ω 负载电阻反映到一次绕组为 400Ω 所需的匝数比是什么？

14.6　阻抗匹配

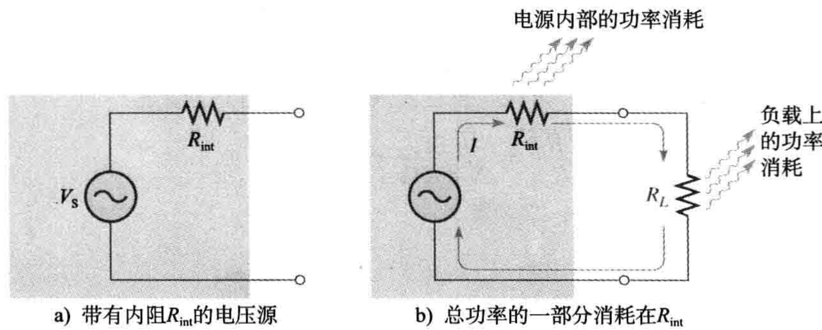
变压器的一个应用是作负载阻抗与电源阻抗的匹配，以实现最大功率传输或其他结果。这一技术称为阻抗匹配。在音频系统中，常使用特殊的宽带变压器通过选择合适的匝数比实现从放大器到扬声器的最大可能的功率传输。专门为阻抗匹配设计的变压器通常显示其设计匹配的输入和输出阻抗。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论用变压器实现阻抗匹配；
- 讨论最大功率传输定理；
- 定义阻抗匹配；
- 说明阻抗匹配的用途；
- 描述平衡不平衡转换变压器。

最大功率传输定理指出，从电阻性电源向电阻负载传输最大功率的条件是：负载电阻等于电源电阻（见 6.7 节）。在交流电路中，对电流的总阻碍称为阻抗，使电源到负载最大功率传输的过程称为**阻抗匹配**。阻抗匹配最简单也最常见的情况是，电源和负载都是电阻性的，所以，我们将仅限于讨论这种情况。

图 14-20a 显示了一个具有固定内阻的电源，一定的内阻是所有电源内部电路所固有的。图 14-20b 所示为负载接到该电源上。在这种情况下，目标常常是尽可能多地传输功率到负载。



a) 带有内阻 R_{int} 的电压源　　b) 总功率的一部分消耗在 R_{int}

图 14-20　非理想电压源向负载的功率传输

在大多数实际情况下，各种类型电源的内阻是固定的，同样在许多场合作为负载的器件的电阻也是固定不变的，如果需要给一个给定电源接一个给定的负载，它们的电阻正好匹配的情况很少。在这种情况下，一种特殊类型的宽带变压器可派上用场，利用变压器提供的反映电阻特性，可使负载电阻表现得和电源内阻阻值相同，这种技术称为阻抗匹配，该变压器则称为阻抗匹配变压器。

图 14-21 显示了一个阻抗匹配变压器的特例。本例中电源驱动 300Ω 负载，阻抗匹配变压器需要使负载转换为与电源内阻相同的 75Ω，这样可以向负载提供最大功率。要选择正确的变压器，必

须知道匝数比对阻抗的影响。当我们知道了R_L和R_{pri}时，可利用公式（14-8）确定匝数比n。

$$R_{pri} = \left(\frac{1}{n}\right)^2 R_L$$

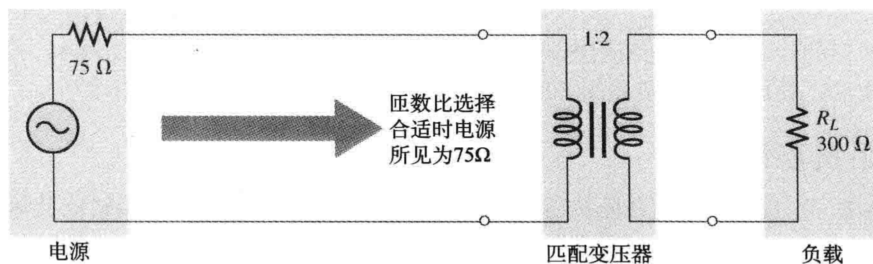


图 14-21 用变压器作最大功率传输耦合负载与电源匹配的例子

方程两边交换并同除以R_L，得

$$\left(\frac{1}{n}\right)^2 = \frac{R_{pri}}{R_L}$$

两边开平方根，得

$$\frac{1}{n} = \sqrt{\frac{R_{pri}}{R_L}}$$

方程两边取倒数，得到下面的匝数比公式：

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{R_{pri}}} \tag{14-9}$$

最后，对于本例特定的300Ω负载与75Ω源内阻的匹配，解出匝数比。

$$n = \sqrt{\frac{300\Omega}{75\Omega}} = \sqrt{4} = 2$$

因此，本例应用中必须使用匝数比为2的匹配变压器。

【例 14-9】 某放大器具有800Ω的内阻，为了给8Ω扬声器传输最大功率，试问必须使用多大匝数比的耦合变压器？

解： 反映电阻必须等于800Ω，因此，由公式（14-9）可确定匝数比。

$$n = \sqrt{\frac{R_L}{R_{pri}}} = \sqrt{\frac{8\Omega}{800\Omega}} = \sqrt{0.01} = 0.1$$

电路图及等效反映电路如图14-22所示。

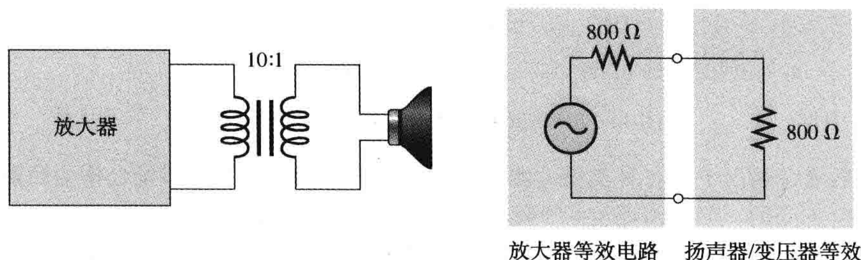


图 14-22

相关问题：为了给两个并联的8Ω扬声器提供最大功率，试问图14-22中的匝数比必须是多少？

平衡不平衡转换变压器　阻抗匹配的一个应用是在高频天线中。除了阻抗匹配，许多传输天线还需要将发射机的不平衡信号转换成平衡信号。平衡信号由两个幅度相等而相位相差 180°的信号组成，不平衡信号则是一种对地参考的信号。一种称为平衡不平衡转换器的特殊变压器可以将来自发射机的不平衡信号转换成天线的平衡信号，如图 14-23 所示。

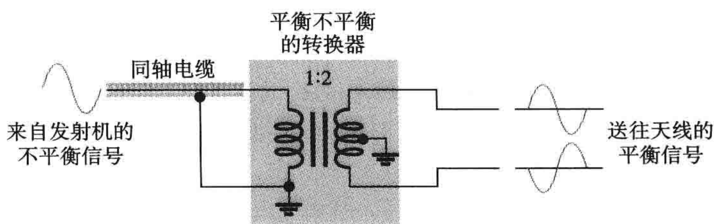


图 14-23　平衡不平衡转换变压器将不平衡信号转换成平衡信号演示

发射机通常由同轴电缆（coax）接到平衡不平衡转换变压器，同轴电缆基本由一个绝缘包裹的内导体与外层屏蔽导体构成。在图 14-23 中，从发射机出来的信号是对地参考的，外层屏蔽导体接地，所以是一种不平衡信号。同轴电缆的屏蔽层可以将辐射噪声最小化。

同轴电缆相应具有一定的特性阻抗，平衡不平衡转换变压器的匝数比设置成使同轴电缆阻抗与天线阻抗匹配，例如，传输天线表现为 300Ω 阻抗，同轴电缆的特性阻抗为 75Ω，则平衡不平衡转换变压器提供匹配的匝数比为 2，如前所述。平衡不平衡转换变压器同时可以将不平衡信号转换成平衡信号。

本节测试题

1. 试问阻抗匹配的含义是什么？
2. 负载电阻与电源电阻匹配的优点是什么？
3. 变压器的匝数比为 0.5，试问二次绕组两端 100Ω 电阻的反映电阻是多少？
4. 平衡不平衡转换变压器有什么用途？

14.7　变压器额定值与特性

我们已经以理想的观点讨论了变压器的工作，也即忽略了绕组电阻、绕组电容和非理想磁心特性，变压器的效率按 100%来处理。对于学习基本概念及在许多应用中理想模型是有效的，但是，实际变压器还有一些非理想特性需要了解。

学习完本节内容，应该能够

- 描述实际变压器的额定值；
- 列举并说明非理想特性；
- 说明变压器的额定功率；
- 定义变压器的效率。

14.7.1　额定值

额定功率　电力变压器通常用额定伏安（V・A）、一次/二次电压和工作频率作额定。例如，给定变压器额定值可指定为 2kVA、500/50、60Hz。2kVA 值为视在功率额定值，500 和 50 可能为二次或一次电压，60Hz 则是其工作频率。

变压器的额定值有助于针对应用选取合适的变压器，例如，我们假设二次电压为 50V，这时负载电流为

$$I_L=\frac{P_{sec}}{V_{sec}}=\frac{2\text{kVA}}{50\text{V}}=40\text{A}$$

另一种情况，二次电压为 500V，则

$$I_L=\frac{P_{sec}}{V_{sec}}=\frac{2\text{kVA}}{500\text{V}}=4\text{A}$$

两种情况下二次绕组都存在可承载的最大电流。

额定功率以伏安（视在功率）表示而不以瓦特（有功功率）表示的原因如下：如果变压器的负载是纯电容或纯电感，提供给负载的有功功率理想情况为零，然而，对于 $V_{sec}=500V$、$X_C=100\Omega$，60Hz频率时的电流为5A，这个电流超过了二次绕组所能承载2kVA的最大电流值4A，尽管这时的有功功率为零，变压器有可能损坏。所以对变压器用瓦特指定功率是没有意义的。

系统注释 谐振充电

通过变压器的作用，谐振电路可用于充电。研究人员正在研究通过两个谐振线圈之间高频磁耦合实现无线传输功率。这个想法可以追溯到尼古拉斯·特斯拉。电动汽车电路板上可能有一个线圈，车停在车库时将通过地面的线圈自动进行充电。在成为电动汽车可行的充电方法前，研究人员还需要解决因变压器损耗而造成的效率问题。

电压及频率额定值 除了视在功率额定值，大多数电力变压器在变压器标牌上还有额定电压和频率。电压额定值包括设计的一次电压和二次绕组接额定负载、一次绕组接额定输入电压时的二次电压。通常情况下，用示意图标明绕组及各绕组的电压额定值。变压器的设计频率也要指定，若变压器工作在错误的频率上，可能会损坏，所以注意频率规格是很重要的。这些是在应用中正确选择电力变压器所需的最少规格参数。

14.7.2 特性

绕组电阻 实际变压器的一次绕组和二次绕组都有绕组电阻（第11章中已经学习了绕组电阻），实际变压器的绕组电阻表示为与绕组串联的电阻，如图14-24所示。

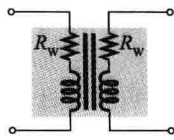


图14-24 实际变压器的绕组电阻

实际变压器中绕组电阻使得二次电压减小，由于绕组电阻的串联从一次和二次电压中减去一个电压降，所以负载电压比关系式 $V_{sec}=nV_{pri}$ 所预计的电压值要小。大多数情况这种影响相对比较小，可以忽略。

磁心损耗 实际变压器的磁心材料总有一些能量转换，这种转换可看做铁氧体和铁心的发热，而在空气心中则不会发生这种转换。这种能量转换部分是因为一次电流变换方向导致连续的磁场反转，此部分能量转换称为磁滞损耗。能量转换为热的其余部分是由涡流时产生的。根据法拉第电磁感应定律，变化的磁通在磁心材料中感应出电压，并在磁心材料中引起涡流。涡流在磁心材料中经过磁心电阻形成回路，从而产生热量。通过使用叠层结构铁心可以大大减少这种热转换。铁磁材料制成的薄层彼此绝缘，限制了涡流形成的区域，最大限度地减小涡流的建立，使磁心损耗保持到最低限度。

漏磁 理想变压器中假定一次电流产生的磁通全部通过磁心穿过二次绕组，反之亦然。实际变压器中，一次电流产生的磁场部分磁力线会突破磁心而通过周围空气回到绕组另一端形成闭合，如图14-25所示，漏磁使得感应的二次电压减小。

磁通中实际到达二次绕组的百分比确定了变压器的耦合系数，例如，如果9/10磁力线留在磁心内部，则耦合系数为0.90或90%。大多数铁心变压器具有非常高的耦合系数（大于0.99），而铁氧体磁心和空气磁心变压器的耦合系数较低。

绕组电容 我们在第11章学过，绕组的相邻匝之间总是存在一些杂散电容，这些杂散电容导致变压器每个绕组都有一个并联的等效电容，如图14-26所示。

低频时由于电抗（X_C）非常高，这些杂散电容对变压器的工作影响很小。然而，高频时电抗减小，对一次绕组和二次负载产生旁路效应，结果总一次电流中流过一次绕组的电流减小，总二次电流中流过负载的电流减小，这一效应随着频率升高而减小了负载电压。

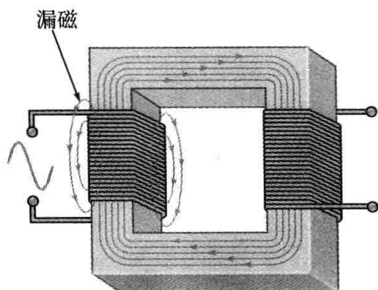


图 14-25 实际变压器的漏磁

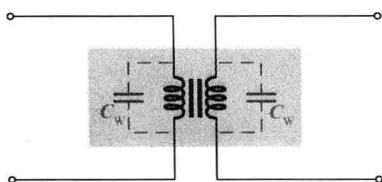


图 14-26 实际变压器的绕组电容

小贴士 如果小型变压器无标记，可以用低输出电压的信号发生器来检查输入（一次绕组）与输出（二次绕组）的电压比即匝数比，这比使用 120 V 交流带电操作安全。通常情况下，一次绕组的接线为黑色，低压二次绕组接线为绿色，高压二次绕组接线为红色，条纹丝接线通常表示中心抽头。不幸的是，并非所有的变压器的接线都是有颜色的，或接线并不总是标准颜色。

变压器效率 理想变压器的二次功率等于一次功率，因为刚刚讨论的实际变压器非理想特性导致部分功率损失，所以二次（输出）功率总是小于一次（输入）功率。变压器效率用希腊字母 η 表示，它是输入功率中传输给输出的百分比的度量。

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)100\% \tag{14-10}$$

大多数电力变压器效率都超过 95%。

【例 14-10】 某种变压器的一次电流为 5A，一次电压为 4800V，二次电流为 95A，二次电压为 240V。求该变压器的效率。

解： 输入功率为

$$P_{in} = V_{pri}I_{pri} = 4800\text{V} \times 5\text{A} = 24\text{kV}\cdot\text{A}$$

输出功率为

$$P_{out} = V_{sec}I_{sec} = 240\text{V} \times 95\text{A} = 22.8\text{kV}\cdot\text{A}$$

效率为

$$\eta = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)\times 100\% = \left(\frac{22.8\text{kV}\cdot\text{A}}{24\text{kV}\cdot\text{A}}\right)\times 100\% = 95\%$$

相关问题：变压器一次电压为 440V，一次电流为 9A，二次电压为 120V，二次电流为 30A，试问其效率是多少？

系统举例 14-2 感应加热系统

加热电导体的一种广泛使用的方法是使用线圈包住待加热的导电性材料。加热是诸如钎焊、锡焊、热处理、退火、干燥黏合剂和涂料、橡胶成型前预加热金属及许多其他过程的重要工作。热线圈类似变压器的一次绕组，而被加热的导电材料作为二次绕组。用于在材料中通过变压器作用感应电流的交流电频率从 60Hz 到 1 MHz 以上，加热元件视同短路的二次绕组，感应出大涡流来加热元件。

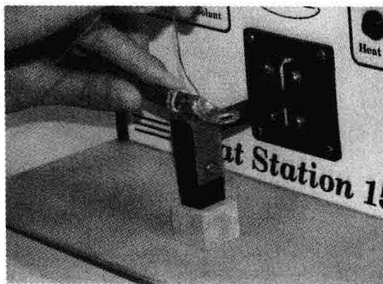


图 14-27 用于焊接的基本感应加热单元（图片由 MagneForce，Inc. 提供）

图 14-27 显示了一个基本感应加热单元，根据需要，加热单元大小和加热特性的范围很广。感应加热的一个重要优点是材料几乎能够瞬间加热（加热到 2000°F 用时不到

1s)，加热模式是可重复的，可以根据不同应用提供自定义的温度曲线。例如，焊接罐头的工作可以连续地迅速完成，这是生产线的主要优势。

图14-28显示了基本加热系统的方框图，这是一个大型过程（未示出）中的一部分，交流输入经电源转换为直流，然后再转换成高频交流（根据材料及所需的加热深度选择频率），控制器感测到加热部分就绪时，将开关合上通过阻抗匹配变压器施加功率给线圈。

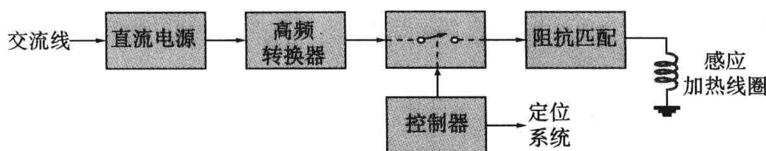


图14-28　加热单元方框图

本节测试题

1. 说明实际变压器与理想模型有什么不同。
2. 某变压器的耦合效率为0.85，试问这说明什么？
3. 某变压器的额定值为10kVA，如果二次电压为250V，试问变压器能够承载多大的负载电流？

14.8　抽头和多绕组变压器

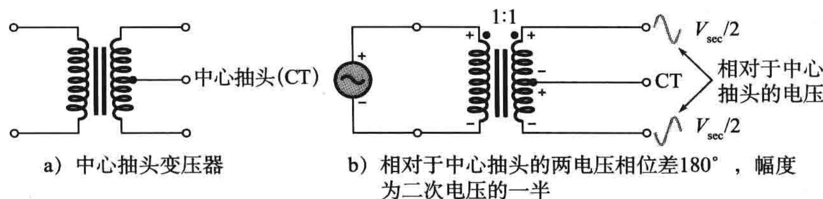
基本变压器有几种重要的变形，包括中心抽头变压器、多绕组变压器和自耦变压器，本节还要介绍一种基本多绕组变压器——三相变压器。

学习完本节内容，应该能够

- 描述几种变压器；
- 描述中心抽头变压器；
- 描述多绕组变压器；
- 描述自耦变压器；
- 说明三相变压器的连接方式。

14.8.1　抽头变压器

带有中心抽头二次绕组的变压器原理图如图14-29a所示，中心抽头等效于两个二次绕组，每一个二次绕组分得总电压的一半。



a）中心抽头变压器　　b）相对于中心抽头的两电压相位差180°，幅度为二次电压的一半

图14-29　中心抽头变压器的工作原理

任何时刻，二次绕组两个端与中心抽头之间的电压幅度都相等但极性相反，如图14-29b所示。这里整个二次绕组两端电压显示为上正下负，例如在正弦电压的某个瞬间。中心抽头电压没有上端正但比二次绕组下端正，因此，相对于中心抽头测量，二次绕组上端电压为正，而下端电压为负，这种中心抽头特征用于许多将交流电压转换为直流的电源整流电路中，如图14-30所示，也用在阻抗匹配变压器中。

有些抽头变压器的抽头不是二次绕组的电气中心，另外，在有些应用中有时还会出现多个

一次或二次抽头的情况，这类变压器的例子如图 14-31 所示。

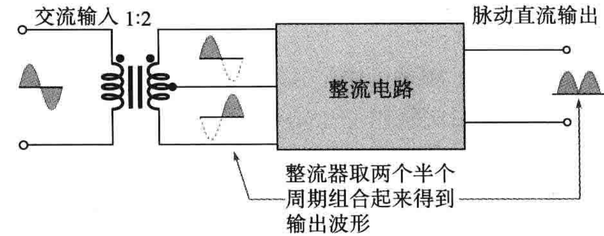


图 14-30 中心抽头变压器在交流-直流转换中的应用

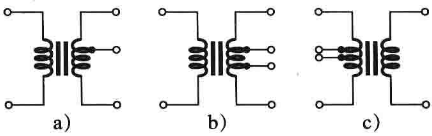


图 14-31 抽头变压器

电力公司在配电系统中使用很多抽头变压器。通常，电力以三相功率形式产生与传输，而在某些地方则需要将三相功率转换为单相供住宅使用。一根电线杆上变压器的例子如图 14-32 所示，这里高压三相电源先前已被转换为单相电源（取用三相中的一相），需要将电压转换为住户所用的 120V/240V，使用单相抽头变压器。通过在原边选择适当的抽头，电力公司对电压稍作调整即可输送给用户。二次绕组的中心抽头是中性导体（通常不绝缘）。

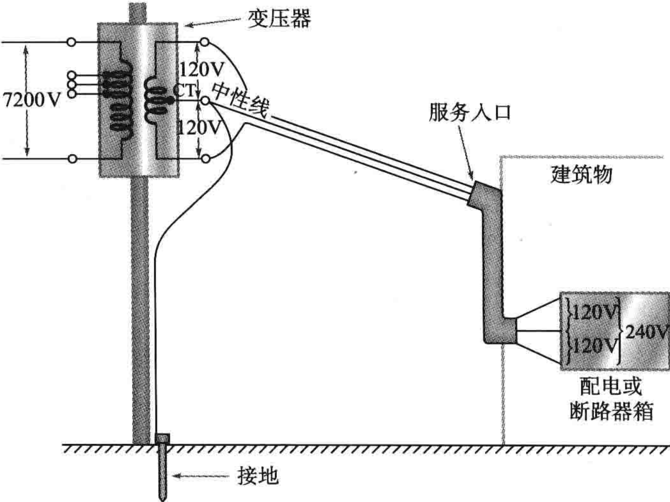
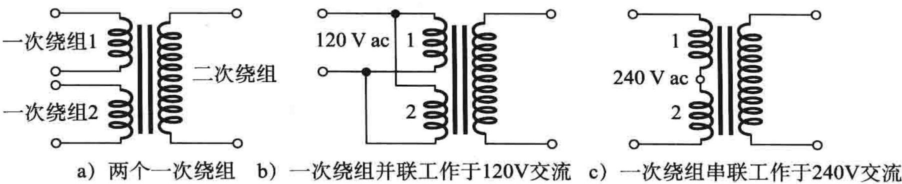


图 14-32 典型配电系统中电线杆上的变压器

14.8.2 多绕组变压器

有些变压器设计成可在 120V 或 240V 交流线路电压下工作，这些变压器通常具有两个一次绕组，每个绕组设计用于 120V 交流电压，把两个绕组串联起来，变压器就可以工作在 240V 交流电压，如图 14-33 所示。



a）两个一次绕组 b）一次绕组并联工作于120V交流 c）一次绕组串联工作于240V交流

图 14-33 多一次绕组变压器

多个二次绕组可能绕在一个公共磁心上，常用具有多个二次绕组的变压器对一次电压进行升压或降压得到多个电压，这通常用在电子系统工作需要多个电压的电源应用中。

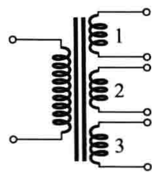


图 14-34 多二次绕组变压器

具有多个二次绕组的变压器典型原理图如图 14-34 所示，该变压器具有三个二次绕组。有时我们会发现多一次绕组、多二次绕组和中心抽头的变压器组合在一个单元中。

【例 14-11】 图 14-35 所示的变压器标注了每一个二次绕组对一次绕组的匝数比，其中一个二次绕组作为中心抽头，如果一次绕组接 120V 交流电，试确定每个二次电压及中间二次绕组相对于中心抽头的电压。

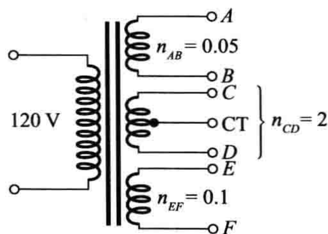


图 14-35

解：

$$V_{AB}=n_{AB}V_{\text{pri}}=0.05\times 120\text{V}=6.0\text{V}$$

$$V_{CD}=n_{CD}V_{\text{pri}}=2\times 120\text{V}=240\text{V}$$

$$V_{(CT)C}=V_{(CT)D}=\frac{240\text{V}}{2}=120\text{V}$$

$$V_{EF}=n_{EF}V_{\text{pri}}=0.1\times 120\text{V}=12\text{V}$$

相关问题：如果一次绕组匝数减半，重复本例计算。

14.8.3 自耦变压器

自耦变压器的应用包括启动工业感应电动机和调节输电线路电压。在自耦变压器中，一个绕组既作一次绕组又作二次绕组。在绕组适当点抽头，以得到预期升压或降压的匝数比。

自耦变压器不同于常规变压器，一次和二次电路之间没有电气隔离，两者是同一个绕组。自耦变压器通常比等效的传统变压器更小、更轻，因为对于给定负载自耦变压器的 kV·A 额定值小得多。许多自耦变压器使用滑动接触装置提供可调节的抽头，使输出电压可调（通常称为调压器），图 14-36 显示出几种自耦变压器的原理符号。

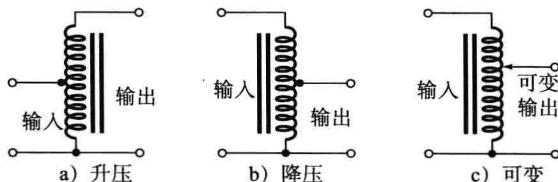


图 14-36 几种自耦变压器

14.8.4 三相变压器

第 8 章介绍了三相功率及相关的发电机和电动机，三相变压器广泛应用于配电系统，三相是电力产生、传输和使用的最常用方式。三相电力一般不使用在住宅应用领域，但在工业上特别有用，因为三相电机的效率更高。

三相变压器由三组一次和二次绕组构成，每组绕组绕在铁心组件的一个柱上，基本上就是三个单相变压器共享一个共同的磁心，如图 14-37 所示。将三个单相变压器连接在一起也可能达到相同的结果（但更昂贵）。三相变压器中，三个相同的一次绕组和三个相同的二次绕组有两种连接方式：三角形（△）接法或星形（Y）接法，形成完整的变压器单元。三角形和星形连接如图 14-38 所示。

在三相变压器中，三角形和星形连接可能的组合为

1）三角形-星形（△—Y）。一次绕组为三角形连接，二次绕组为星形连接，这是在商业和工业领域最常用的接法。

2）三角形-三角形（△—△）。一次绕组和二次绕组均作三角形连接，这同样是工业领域常见的接法。

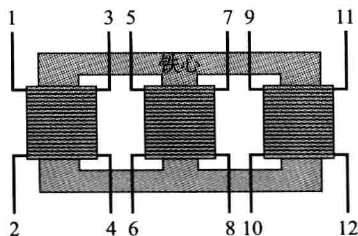


图 14-37　三相变压器图

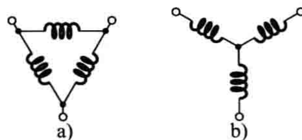


图 14-38　三角形和星形连接

3）星形-三角形（Y—△）。一次绕组为星形连接，二次绕组为三角形连接，这种接法用于高压传输应用中。

4）星形-星形（Y—Y）。一次绕组和二次绕组均作星形连接，这种接法用于高电压、低 kVA 的应用中。

三角形-星形（△—Y）连接如图 14-39 所示。连接变压器时，必须遵守适当的绕组相位。在三角形连接的绕组必须由＋到－，星形连接的每个绕组的接到中心点极性必须相同。

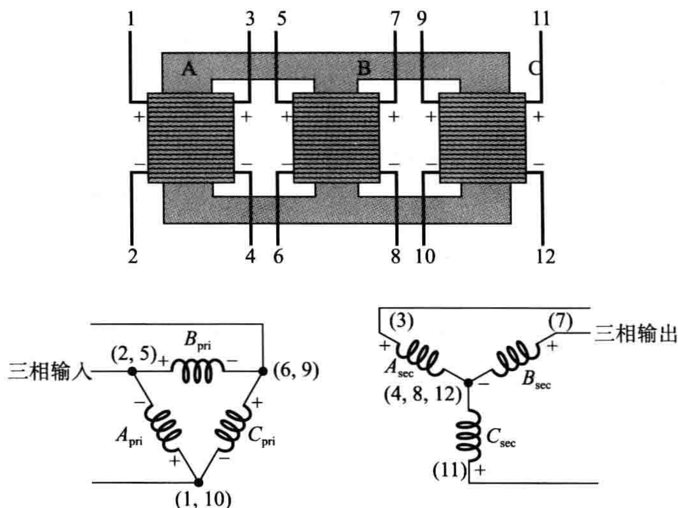


图 14-39　三角形-星形变压器连接。一次绕组标记为 A_{pri}、B_{pri}、C_{pri}，二次绕组标记为 A_{sec}、B_{sec}、C_{sec}，括号中的数字对应于变压器的引线

星形结构有一个优点，即连接的中心结点是中性的。三角形结构一般没有中性点，唯一例外的特殊情况是将三相输电线路电压转换成住宅使用的单相电源。在这种情况下，使用带有中心抽头的星形-三角形变压器，如图 14-40 所示。这种结构被称为四线三角形，用在不提供单相供电的情况。

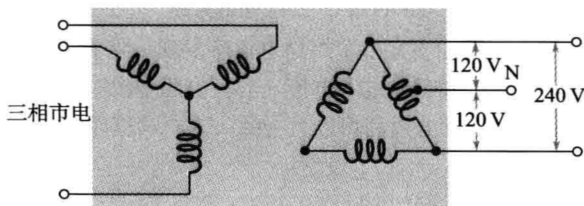


图 14-40　用于将三相市电转换成单相住宅用电的抽头三角形-星形变压器

本节测试题

1. 某变压器有两个二次绕组，从一次绕组到第一二次绕组的匝数比是10，从一次绕组到另一个二次绕组的匝数比是0.2，如果一次绕组加240V交流电压，试问二次电压是多少？
2. 说出自耦变压器相对于常规变压器的一个优点和一个缺点。
3. 三相变压器最常见的连接结构是什么？

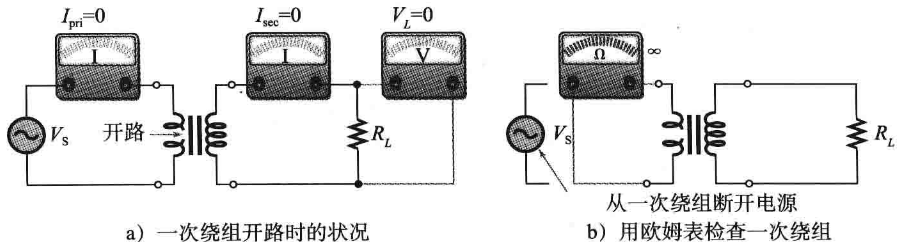
14.9 故障排除

在其指定范围内变压器是一种可靠的设备。变压器的常见故障是一次或二次绕组的开路，造成开路的一个原因是设备工作超出了额定值。通常变压器损坏后很难修理，因此，最简单的处理就是更换。

学习完本节内容，应该能够

- 对变压器进行故障排除；
- 找出一次绕组或二次绕组的开路。

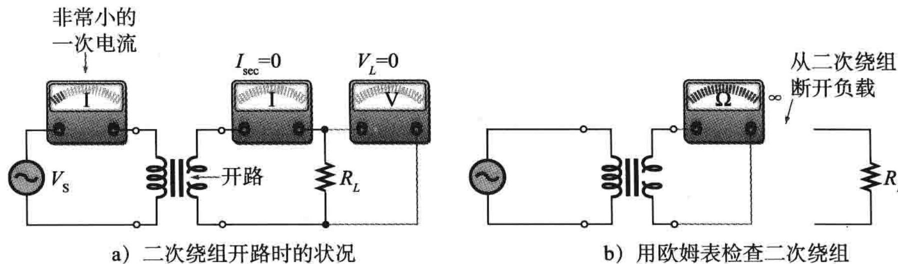
当一次绕组出现开路时，没有了一次电流，因而在二次绕组中也就没有感应电压和电流。图14-41a说明了这种状况，利用欧姆表检查的方法如图14-41b所示。



a) 一次绕组开路时的状况　　b) 用欧姆表检查一次绕组

图14-41 一次绕组开路

当二次绕组出现开路时，在二次电路中没有电流，结果负载两端没有电压。二次绕组开路还会使得一次电流非常小（仅有少量的励磁电流），事实上，一次电流可能几乎为零。图14-42a说明了这种状况，利用欧姆表检查的方法如图14-42b所示。



a) 二次绕组开路时的状况　　b) 用欧姆表检查二次绕组

图14-42 二次绕组开路

绕组短路是非常罕见的，如果确实发生了短路也很难发现，除非有看得见的痕迹或大量的绕组短路。完全短路的一次绕组会从电源吸取过大电流，若在电路中没有断路器或熔断器，电源或变压器或两者都可能烧坏。一次绕组的部分短路可能会导致一次电流高于正常值甚至超过额定值。

本节测试题

1. 试问变压器最可能发生的故障是什么？
2. 试问变压器常见的故障原因是什么？

本章小结

- 变压器一般由绕在同一磁心上的磁耦合的两个或多个线圈组成。
- 两个磁耦合的线圈之间存在互感。
- 一个线圈中电流变化时，在另一线圈中将感应出电压。
- 一次绕组是接电源的绕组，二次绕组是接负载的绕组。
- 一次绕组的匝数和二次绕组的匝数确定了匝数比。
- 一次电压和二次电压的相对极性由绕组在磁心上的绕向决定。
- 升压变压器的匝数比大于 1。
- 降压变压器的匝数比小于 1。
- 变压器不能增大功率。
- 理想变压器中从电源送出的功率（输入功率）等于传输给负载的功率（输出功率）。
- 电压提升则电流降低，反之亦然。
- 接在变压器二次绕组的负载对电源表现为反映电阻，其值与匝数比平方的倒数相关。
- 通过选择合适的匝数比，阻抗匹配变压器能使负载电阻与电源电阻匹配，获得对负载的最大功率传输。
- 平衡不平衡转换变压器是一种用于平衡线（如双绞线布线）与不平衡线（如同轴电缆）之间转换的变压器。
- 变压器对恒定直流没有响应。
- 实际变压器中电能到热能的转换由绕组电阻、磁心的磁滞损耗、磁心涡流和漏磁引起。
- 三相变压器常用于配电应用中。

关键术语

视在功率额定值（Apparent power rating） 对变压器额定的方法，将功率容量表示成伏安（VA）值。

中心抽头（Center tap，CT） 变压器绕组的中心连接点。

电气隔离（Electrical isolation） 两个电路之间没有公共导电路径的一种状态。

阻抗匹配（Impedance matching） 用来匹配负载电阻与电源电阻以达到最大功率传输的一种技术。

磁耦合（Magnetic coupling） 两个线圈之间的磁连接，结果是一个线圈的变化磁力线穿过第二线圈。

互感（Mutual inductance，L_M） 两个分立线圈之间的电感，如变压器。

一次绕组（Primary winding） 变压器的输入绕组。

反映电阻（Reflected resistance） 二次绕组电路反映到一次绕组电路的电阻。

二次绕组（Secondary winding） 变压器的输出绕组。

变压器（Transformer） 一种由两个或多个相互电磁耦合的线圈（绕组）构成的电气设备，一个绕组到另一个绕组存在互感。

匝数比（Turns ratio，n） 二次绕组匝数与一次绕组匝数之比。

关键公式

公式	说明
(14-1) $L_M = k\sqrt{L_1 L_2}$	互感
(14-2) $k = \dfrac{\phi_{1-2}}{\phi_1}$	耦合系数
(14-3) $n = \dfrac{N_{sec}}{N_{pri}}$	匝数比
(14-4) $\dfrac{V_{sec}}{V_{pri}} = \dfrac{N_{sec}}{N_{pri}}$	电压比
(14-5) $V_{sec} = nV_{pri}$	二次电压
(14-6) $\dfrac{I_{pri}}{I_{sec}} = n$	电流比
(14-7) $I_{sec} = \left(\dfrac{1}{n}\right)I_{pri}$	二次电流

(14-8) $R_{pri}=\left(\frac{1}{n}\right)^2 R_L$ 反映电阻

(14-9) $n=\sqrt{\frac{R_L}{R_{pri}}}$ 阻抗匹配的匝数比

(14-10) $\eta=\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)100\%$ 变压器效率

是非测验题

1. 理想变压器传递给负载的功率与传递到一次绕组的功率相同。
2. 变压器原理图上的点表明了输入与输出的相位关系。
3. 降压变压器的一次绕组匝数比二次绕组匝数多。
4. 变压器一次电流总是大于二次电流。
5. 变压器没有负载时的功率因数为1。
6. 阻抗匹配变压器从电源向负载传输最大电压。
7. 反映电阻与绕组电阻相同。
8. 平衡不平衡转换器是一种阻抗匹配变压器。
9. 电力变压器通常用VA作额定而不用瓦特。
10. 变压器效率是输出电压除以输入电压的比值。

自测题

1. 变压器用在
   (a) 直流电压 (b) 交流电压
   (c) (a) 和 (b)
2. 下列哪个量受匝数比影响
   (a) 一次电压 (b) 直流电压
   (c) 二次电压 (d) 以上都不受影响
3. 如果某变压器匝数比为1的绕组以相反方向绕在磁心上，则二次电压为
   (a) 与一次电压同相位
   (b) 小于一次电压
   (c) 大于一次电压
   (d) 与一次电压反相
4. 当变压器匝数比为10且一次电压为6V时，二次电压为
   (a) 60V (b) 0.6V
   (c) 6V (d) 36V
5. 当变压器匝数比为0.5且一次电压为100V时，二次电压为
   (a) 200V (b) 50V
   (c) 10V (d) 100V
6. 某变压器一次绕组为500匝，二次绕组为2500匝，匝数比为
   (a) 0.2 (b) 2.5
   (c) 5 (d) 0.5
7. 如果10W功率加入匝数比为5的理想变压器一次绕组，则二次绕组提供给负载的功率为
   (a) 50W (b) 0.5W
   (c) 0W (d) 10W
8. 某带负载的变压器二次电压为一次电压的1/3，理想情况下二次电流为
   (a) 一次电流的1/3
   (b) 一次电流的3倍
   (c) 等于一次电流
   (d) 小于一次电流
9. 一个1.0kΩ负载电阻接在变压器二次绕组两端，变压器匝数比为2，则电源“看到”的反映负载是
   (a) 250Ω (b) 2kΩ
   (c) 4kΩ (d) 1.0kΩ
10. 在问题9中，如果匝数比为0.5，则电源“看到”的反映负载是
    (a) 1.0kΩ (b) 2kΩ
    (c) 4kΩ (d) 500Ω
11. 50Ω电源与200Ω负载匹配的匝数比为
    (a) 0.25 (b) 0.5
    (c) 4 (d) 2
12. 从电源向负载传输最大功率的条件是
    (a) $R_L>R_{int}$ (b) $R_L<R_{int}$
    (c) $R_L=R_{int}$ (d) $R_L=nR_{int}$
13. 当12V电池接到匝数比为4的变压器一次绕组两端时，二次电压是
    (a) 0V (b) 12V
    (c) 48V (d) 3V
14. 某变压器匝数比为1，耦合余数为0.95，当一次绕组加1V交流电压时，二次电压为
    (a) 1V (b) 1.95V
    (c) 0.95V

习题

基本习题

14.1 节

1. 当 $k=0.75$、$L_1=1\mu H$、$L_2=4\mu H$ 时，互感是多少？
2. 当 $L_M=1\mu H$、$L_1=8\mu H$、$L_2=2\mu H$ 时，求耦合系数。

14.2 节

3. 一次绕组为 120 匝、二次绕组为 360 匝的变压器的匝数比是多少？
4. (a) 一次绕组为 250 匝、二次绕组为 1000 匝的变压器的匝数比是多少？
   (b) 一次绕组为 400 匝、二次绕组为 100 匝的变压器的匝数比是多少？
5. 求图 14-43 中各个变压器相对于一次电压的二次电压的相位。

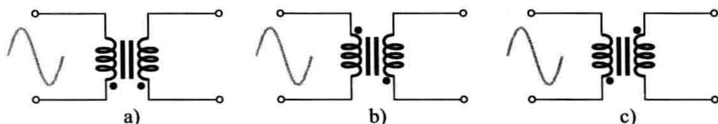


图 14-43

14.3 节

6. 匝数比为 1.5 的变压器一次绕组接 120V 交流，试问二次电压是多少？
7. 某变压器一次绕组为 250 匝，为了得到加倍的二次电压，试问二次绕组必须要多少匝？
8. 欲在匝数比为 10 的变压器副边得到 60V 交流电压，试问变压器原边应加多大交流电压？
9. 对图 14-44 中的各个变压器，画出显示与一次电压关系的二次电压，并标出电压大小。

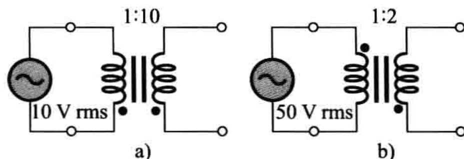


图 14-44

10. 为了将 120V 降到 30V，匝数比必须是多大？
11. 变压器一次绕组两端的电压为 1200V，如果匝数比为 0.2，试问二次电压是多少？
12. 变压器匝数比为 0.1，为了在二次绕组得到 6V 交流电压，试问必须在一次绕组加多大电压？
13. 试问图 14-45 中各个电路负载两端的电压是多少？
14. 如果图 14-45 中各个二次绕组的底端接地，试问负载电压会不会改变？
15. 求图 14-46 中未标示值的电表读数。
16. 如果图 14-46a 中电路的 R_L 加倍，试问二次电表读数会是多少？

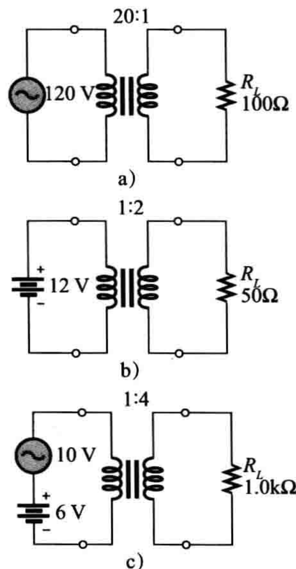


图 14-45

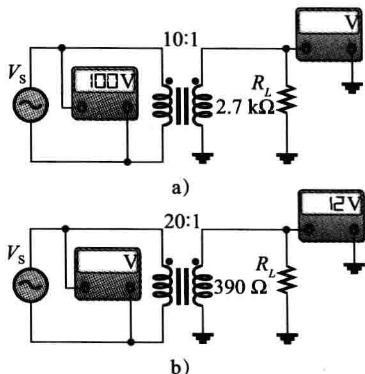


图 14-46

14.4 节

17. 求图 14-47 中的 I_{sec}。

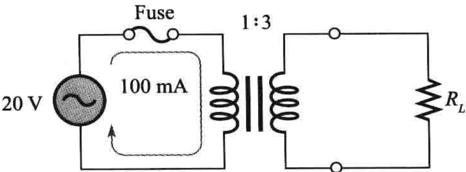


图　14-47

18. 求图 14-48 中下列各量：

(a) 二次电压　(b) 二次电流

(c) 一次电流　(d) 负载功率

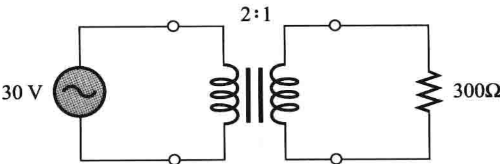


图　14-48

14.5 节

19. 图 14-49 中电源所见到的负载电阻是多少？

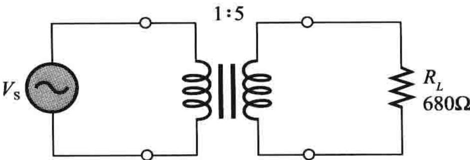


图　14-49

20. 图 14-50 中反映到一次电路绕组的电阻是多少？

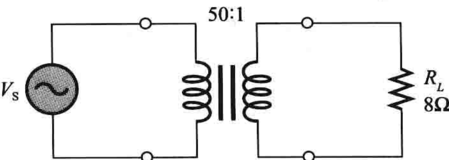


图　14-50

21. 在图 14-50 中，如果电源电压的有效值为 120V，试问一次电流的有效值是多少？

22. 图 14-51 中为了使反映到一次电路的电阻为 300Ω，匝数比必须是多少？

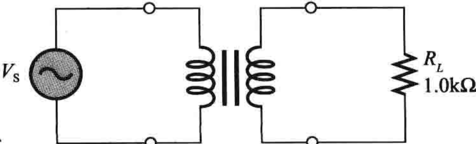


图　14-51

14.6 节

23. 对于图 14-52 中的电路，求给 4Ω 扬声器传输最大功率所需的匝数比。

24. 在图 14-52 中，传输给扬声器的最大功率是多少瓦特？

25. 在图 14-53 中，电源电阻为 50Ω，为了获得最大功率传输，求 R_L 必须调整为何值？

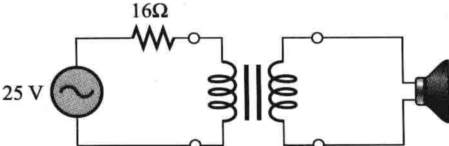


图　14-52

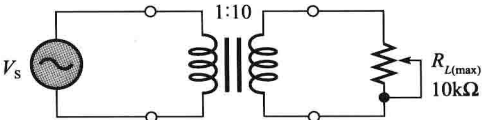


图　14-53

26. 在图 14-53 中，$R_{int}=50\Omega$，$V_S=10V$，试画出 R_L 值从 1kΩ 到 10kΩ、步进值为 1kΩ 的功率曲线。

14.7 节

27. 某变压器原边输入功率为 100W，如果消耗在绕组电阻上 5.5W，试问忽略其他损耗时输出给负载的功率是多少？

28. 习题 27 中变压器的效率是多少？

29. 变压器原边产生的总磁通中有 2%不穿过二次绕组，求该变压器的耦合系数。

30. 某变压器额定值为 1kVA，工作在 60kHz、120V 的交流中，二次电压为 600V。

(a) 最大负载电流是多少？

(b) 可驱动的最小 R_L 是多少？

(c) 可连接作负载的最大电容是多少？

31. 变压器二次电压为 2.5kV，必须承载的最大负载电流为 10A，试问该变压器需要的额定值是多少 kVA？

14.8 节

32. 求图 14-54 中标出的各未知电压。

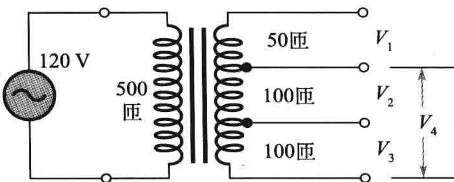


图　14-54

33. 利用图 14-55 中标出的二次电压，求一次绕组对各个抽头部分的匝数比。

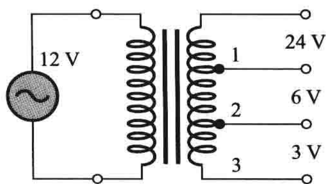


图 14-55

34. 在图 14-56 中，每个一次绕组可承受 120V 交流，说明原边应如何连接才能工作在 240V 交流，求各个二次绕组的电压。

35. 求图 14-56 中每个一次绕组对每个二次绕组的匝数比。

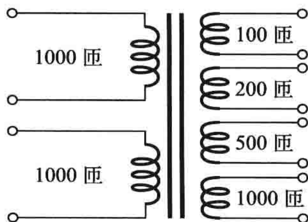


图 14-56

14.9 节

36. 当变压器一次绕组加 120V 交流时，检查二次电压为 0V，进一步检查发现一次绕组和二次绕组都没有电流，试列出可能的故障，试问分离问题的下一步是什么？

37. 如果变压器的一次绕组短路，试问最有可能发生什么？

高级习题

38. 图 14-12 的电源设计用来提供＋5.0V、1A 输出，但熔丝仅在 1/8A 时就熔断，说明为什么熔丝不是在额定输出电流时熔断。

39. 对于图 14-57 中的带负载二次抽头变压器，求下列各量：
(a) 所有负载电压和电流。
(b) 从一次绕组看进去的电阻。

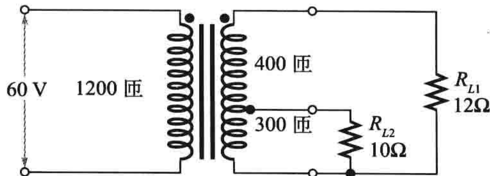


图 14-57

40. 某变压器额定值为 5kVA、2400/120V、60Hz。
(a) 如果 120V 是二次电压，试问匝数比是多少？
(b) 如果 2400V 是一次电压，试问二次电流的额定值是多少？
(c) 如果 2400V 是一次电压，试问一次电流的额定值是多少？

41. 求图 14-58 中各个电压表的测量值，板凳型电表的一端接地。

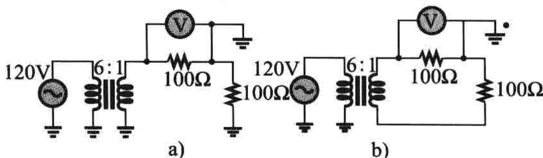


图 14-58

42. 在图 14-59 中，当电源内阻为 10Ω 时，为了给

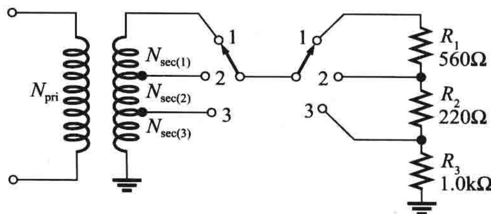


图 14-59

每个负载传输最大功率，求每个开关位置对应的匝数比。如果一次绕组为 100 匝，指出二次绕组的匝数。

43. 在图 14-50 中，假设变压器是理想的，若一次电压 120V 时一次电流限制在 3mA，试问匝数比必须是多少？

44. 假设额定容量 10VA 的变压器一次绕组上加 120V 交流电压，输出电压为 12.6V，试问在二次绕组上可接的最小负载电阻值是多少？

45. 降压变压器的一次电压为 120V，二次电压为 10V，如果二次绕组最大额定电流为 1A，试问一次绕组侧熔丝应选择多大额定值？

Multisim 仿真故障排除习题

46. 打开文件 P14-46，测试电路，如果有故障，请识别该故障。

47. 打开文件 P14-47 并测试电路，如果有故障，请识别该故障。

48. 试确定文件 P14-48 中电路是否存在故障，如果有，请识别故障。

49. 在文件 P14-49 的电路中查找并指定故障元件。

各节测试题答案

14.1 节

1. 互感是两个线圈之间的电感，由线圈之间的耦合量确定。
2. $L_M = k\sqrt{L_1 L_2} = 45mH$
3. k 增大时感应电压增大。

14.2 节

1. 变压器的工作基于互感原理。
2. 匝数比是二次绕组匝数与一次绕组匝数之比。
3. 绕组的方向决定了电压的相对极性。
4. $n = N_{sec}/N_{pri} = 0.5$
5. 绕组在印制电路板上形成。

14.3 节

1. 升压变压器提升电压。
2. 二次电压比一次电压大 5 倍。
3. $V_{sec} = nV_{pri} = 2400V$
4. 降压变压器降低电压。
5. $V_{sec} = nV_{pri} = 60V$
6. $n = 12V/120V = 0.1$
7. 电气隔离、浪涌保护、滤除干扰。

14.4 节

1. 二次电流是一次电流的一半。
2. $n=0.25$；$I_{sec} = (1/n)\ I_{pri} = 2A$
3. $I_{pri} = nI_{sec} = 2.5A$
4. 断开负载将引起电弧，可能损坏变压器及设备，并存在电击危害。

14.5 节

1. 反映电阻是指从一次电路来看的二次电路中的电阻，是匝数比的函数。
2. 匝数比的倒数确定反映电阻。
3. $R_{pri} = (1/n)^2 R_L = 0.5\Omega$
4. $n = \sqrt{R_L/R_{pri}} = 0.1$

14.6 节

1. 阻抗匹配就是使得电源与负载之间以最大功率传输。
2. 当 $R_L = R_{int}$ 时负载得到最大功率。
3. $R_{pri} = (1/n)^2 R_L = 400\Omega$
4. 将不平衡信号转换成平衡信号（或反之）并提供阻抗匹配。

14.7 节

1. 在实际变压器中，电能转化为热降低了效率，理想变压器的效率为 100%。
2. 当耦合系数为 0.85 时，一次绕组产生的磁通中 85%穿过二次绕组。
3. $I_L = 10kVA/250V = 40A$

14.8 节

1. $V_{sec} = 10 \times 240V = 2400V$；$V_{sec} = 0.2 \times 240V = 48V$
2. 同样额定时自耦变压器更小、更轻，自耦变压器不提供电气隔离。
3. 三角形-星形结构。

14.9 节

1. 最可能的故障是绕组开路。
2. 在超过额定值工作引起变压器故障。

例题中相关问题答案

例 14-1　387μH

例 14-2　0.75

例 14-3　5000 匝

例 14-4　480V

例 14-5　57.6V

例 14-6　5mA；400mA

例 14-7　6Ω

例 14-8　0.354

例 14-9　0.0707 或 14.14：1

例 14-10　91%

例 14-11　$V_{AB} = 12V$；$V_{CD} = 480V$；$V_{(CT)C} = V_{(CT)D} = 240V$；$V_{EF} = 24V$

是非测验题答案

1.T　2.T　3.T　4.F　5.F　6.F　7.F　8.T　9.T　10.F

自测题答案

1.（b）　2.（c）　3.（d）　4.（a）　5.（b）　6.（c）　7.（d）　8.（b）　9.（a）　10.（c）　11.（d）　12.（c）　13.（a）　14.（c）

第15章 有抗电路的时间响应

本章目标

- 说明 RC 积分器的工作原理
- 分析单个脉冲输入的 RC 积分器
- 分析重复脉冲输入的 RC 积分器
- 分析单个脉冲输入的 RC 微分器
- 分析重复脉冲输入的 RC 微分器
- 分析 RL 积分器的工作原理
- 分析 RL 微分器的工作原理
- 讨论积分器和微分器的应用
- 排除 RC 积分器和 RC 微分器的故障

第 10 章和第 12 章中介绍了 *RC* 和 *RL* 电路的频率响应，本章介绍 *RC* 和 *RL* 电路在脉冲输入时的时间响应。

开始本章学习前，应先复习 9.5 节和 11.4 节的内容，理解电容和电感中电压与电流的指数变化，对于学习有抗电路的时间响应非常重要，本章中我们通篇都在使用第 9 章和第 11 章的指数公式。

脉冲输入电路的时间响应是最重要的，在脉冲和数字电路领域，技术人员通常关心的是电压或电流快速变化时间间隔内电路的响应，电路的时间常数与输入脉冲特性（如脉冲宽度和周期）的关系，决定了电路中的电压波形。

积分器和微分器是指在一定条件下实现近似积分和微分数学运算的电路，数学的积分是求和的过程，本章中我们将看到，在一定条件下，积分器能对波形进行平均。数学的微分是对一个量求变化率的过程，而微分器电路产生表示输入变化率的输出。微分器电路在需要定时触发器的系统中很常见，例如雷达系统。

15.1 *RC* 积分器

根据时间响应，从电容两端输出电压的串联 *RC* 电路被称为*积分器*。根据频率看，这种串联 *RC* 电路是一个低通滤波器，积分器这个术语源于数学，在某些条件下，这种电路近似于实现数学的积分运算。

学习完本节内容，应该能够

- 说明 *RC* 积分器的工作原理；
- 描述电容的充电与放电过程；
- 说明电容对瞬时变化电压或电流的反应；
- 描述基本的输出电压的波形。

15.1.1 电容的充电与放电

当 *RC* 积分器的输入接脉冲发生器时，如图 15-1 所示，电容将响应输入脉冲而充电与放电。当输入脉冲从低电平变到高电平时，电容通过电阻充电至高电平，这一充电作用类似于电池通过开关接到 *RC* 电路的情况，如图 15-2a所示。当输入脉冲从高电平变回低电平时，电容通过电源放电。假设电源的电阻与电阻器 *R* 的电阻值相比可以忽略，这个放电作用类似于将电源替换为闭合的

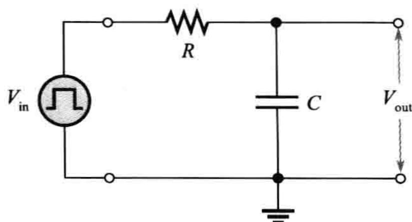
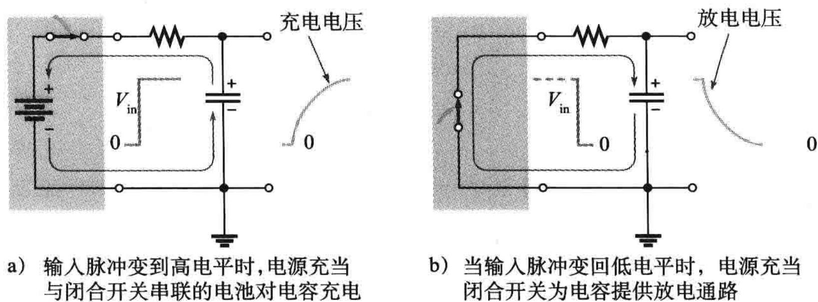


图 15-1 接脉冲发生器的 *RC* 积分器

开关，如图 15-2b 所示。

电容将服从指数曲线进行充电和放电，充电和放电的速率取决于 RC 时间常数，时间常数由 R 和 C 确定（$\tau = RC$）。



a）输入脉冲变到高电平时，电源充当与闭合开关串联的电池对电容充电

b）当输入脉冲变回低电平时，电源充当闭合开关为电容提供放电通路

图 15-2 脉冲源对电容充电和放电的等效作用

对于理想脉冲，两个边沿都是瞬间完成的。电容特性的两个基本规则有助于理解 RC 电路对脉冲输入的响应。

1）电容对瞬变电流表现为短路，对直流表现为开路。

2）电容两端的电压不能瞬间突变——只能按指数变化。

15.1.2 电容电压

RC 积分器中输出为电容电压，脉冲高电平期间电容充电，如果脉冲处于高电平足够长时间，电容将完全充电到脉冲幅度电压，如图 15-3 所示。脉冲低电平期间电容放电，如果脉冲处于低电平足够长时间，电容将完全放电到零，如图 15-3 所示。接着在下一个脉冲到来时将再次充电。

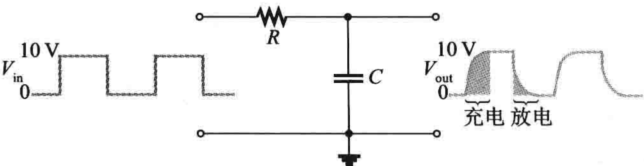


图 15-3 电容对脉冲输入完全充电和放电的演示。图中未画出接在输入端的脉冲发生器，仅给出波形

本节测试题

1. 试定义与 RC 电路相关的积分器。

2. RC 电路中电容充电与放电的原因是什么？

15.2 *RC* 积分器的单脉冲响应

上节我们已经有了 RC 积分器对脉冲输入时间响应的总体印象，本节我们将详细研究单个脉冲的时间响应。

学习完本节内容，应该能够

- 分析单脉冲输入的 RC 积分器；
- 讨论电路时间常数的重要性；
- 定义瞬态时间；
- 确定脉冲宽度大于等于五倍时间常数的响应；
- 确定脉冲宽度小于五倍时间常数的响应。

必须考虑单脉冲输入响应的两种情况：

1. 输入脉冲宽度（t_W）大于等于五倍时间常数（$t_W \geqslant 5\tau$）。
2. 输入脉冲宽度小于五倍时间常数（$t_W < 5\tau$）。

五倍时间常数被认为是电容完全充电或完全放电所需的时间，这个时间常常称为瞬态时间。如果脉冲宽度大于等于五倍时间常数（5τ），电容将完全充电，这一条件表示为 $t_W \geq 5\tau$，脉冲结束电容通过电源完全放电。

图 15-4 演示了固定输入脉冲宽度时各种 RC 瞬态时间的输出波形。与脉冲宽度相比，随着瞬态时间变得越短，输出脉冲的形状越趋近于输入脉冲，每种情况下输出都达到输入的满幅度。

图 15-5 说明了时间常数固定而脉冲宽度变化对积分器输出的影响。随着脉冲宽度的增大，输出脉冲的形状趋近于输入脉冲，说明瞬态时间比脉冲宽度短，而输出的上升和下降时间保持恒定。

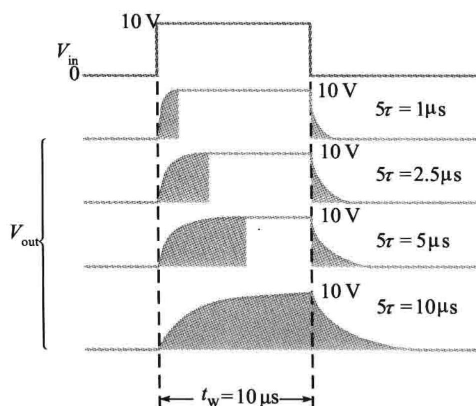


图 15-4 积分器输出脉冲的形状随瞬态时间的变化，阴影区域表示电容正在充电和放电

现在我们来看脉冲宽度小于五倍 RC 积分器时间常数的情况，这一条件可表示为 $t_W < 5\tau$。我们知道，脉冲期间电容充电，因而脉冲宽度就是电容充电的时间，但是，由于脉冲宽度小于电容充满电所需的时间（5τ），在脉冲结束前输出电压将达不到输入电压满幅度，电容仅仅部分充电，如图 15-6 所示的几种 RC 时间常数取值的情况。因为在脉冲宽度期间电容不能充分充电，所以时间常数越长，电容达到的电压越低。当然，单脉冲输入时，脉冲结束后电容都完全放电。

当时间常数比脉冲宽度大得多时，电容充电很少，结果输出电压非常小，几乎为恒定值，如图 15-6 所示。

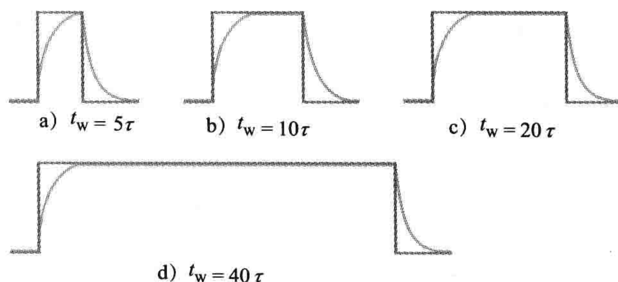


图 15-5 积分器输出脉冲的形状随脉冲宽度的变化（时间常数固定）。深色为输入，浅色为输出

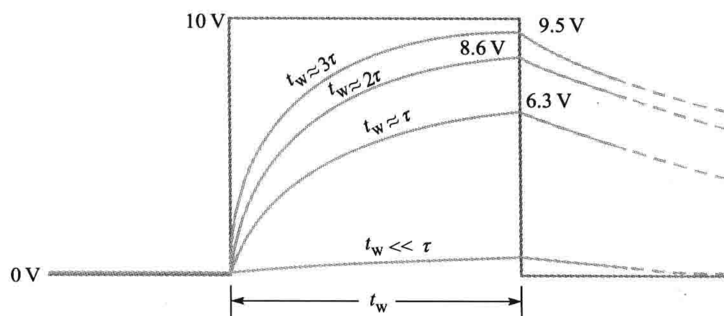


图 15-6 各种瞬态时间比脉冲宽度长时的电容电压。深色为输入，浅色为输出

图 15-7 演示了当时间常数固定而减小脉冲宽度的影响。随着脉冲宽度的减小，由于电容充电时间减少，输出电压变得越来越小，但是，每种情况在脉冲结束后电容都用相同的时间长度（5τ）放电到零。

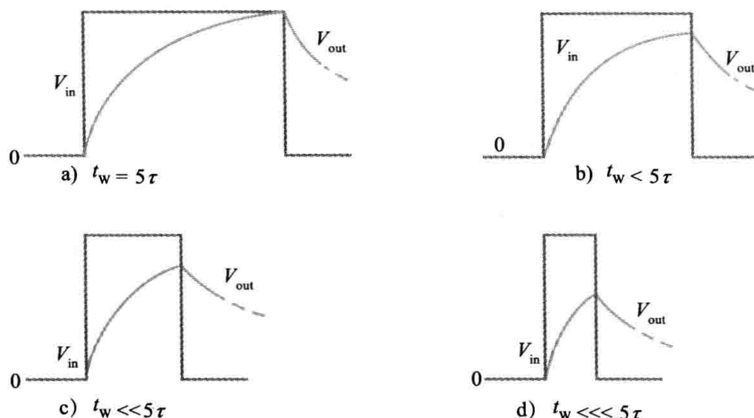


图 15-7　随着输入脉冲宽度的减小电容充电越来越少（时间常数固定）

【例 15-1】　脉冲宽度为 100μs 的 10V 单脉冲加到图 15-8 中的 RC 积分器，假设电源电阻为零。

（a）电容将充电到的电压是多少？

（b）电容放电用多长时间？

（c）画出输出电压的波形。

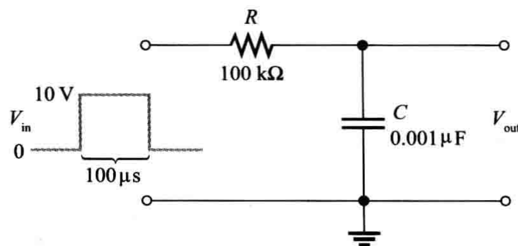


图　15-8

解：（a）电路时间常数为

$$\tau = RC = 100\text{k}\Omega \times 0.001\mu\text{F} = 100\mu\text{s}$$

注意，脉冲宽度正好等于一个时间常数，而一个时间常数间隔电容将充电到大约输入幅度的 63%，所以输出达到的最大电压为

$$V_{out} = 0.63 \times 10\text{V} = 6.3\text{V}$$

（b）脉冲结束后电容通过电源放电，总放电时间为

$$5\tau = 5 \times 100\mu\text{s} = 500\mu\text{s}$$

（c）输出充电和放电曲线如图 15-9 所示。

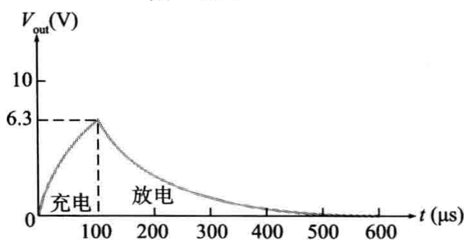


图　15-9

相关问题：如果图 15-8 中输入脉冲宽度增大到 200μs，试问电容将充电到的电压是多少？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E15-01 验证本例及相关问题的计算结果。

【例 15-2】　假设 C 初始未充电，电源电阻为零，试确定图 15-10 中单脉冲加到输入端时电容将充电到的电压值。

解：计算时间常数为

$$\tau = RC = 2.2\text{k}\Omega \times 1\mu\text{F} = 2.2\text{ms}$$

由于脉冲宽度为 5ms，电容充电的时间约为 2.27 个时间常数（5ms/2.2ms ＝2.27），利用指数公式（9-15）求电容将要充电的电压。代入 V_F＝25V、t ＝5ms，计算过程如下：

$$v = V_F(1 - e^{-t/RC}) = 25\text{V} \times 1 - (e^{-5\text{ms}/2.2\text{ms}}) = 22.4\text{V}$$

计算表明，在 5ms 输入脉冲期间，电容充电到 22.4V，当脉冲回到零后，电容将放电回

到零。

相关问题：如果脉冲宽度增大到 10ms，试问 C 将充电到多大？

本节测试题

1. 当输入脉冲加到 RC 积分器时，为使输出电压能够达到输入幅度所需的条件是什么？
2. 对于图 15-11 所示的单脉冲输入电路，求最大输出电压并确定电容放电所需的时间。
3. 对于图 15-11，大致画出输出电压相对于输入脉冲的形状。
4. 如果积分器时间常数等于输入脉冲的宽度，试问电容能完全充电吗？
5. 说明积分器在什么条件下输出电压具有近似输入脉冲的矩形。

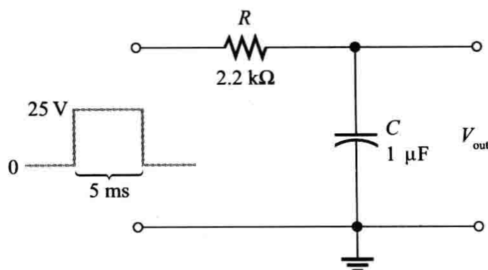


图　15-10

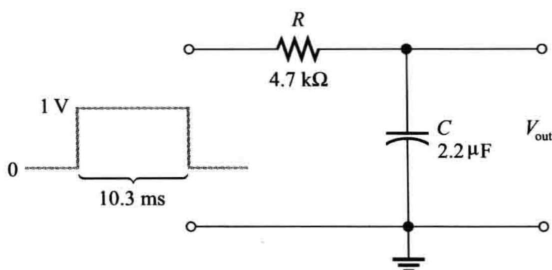


图　15-11

15.3　RC 积分器的重复脉冲响应

在电子系统中碰到重复脉冲波形的情况要比单脉冲多，然而，为了理解积分器电路对重复脉冲的响应，必须先理解电路对单脉冲的响应。

学习完本节内容，应该能够

- 分析重复脉冲输入的 RC 积分器；
- 定义稳定状态；
- 确定当电容不能完全充电或放电时的响应；
- 描述时间常数的变化对电路响应的影响。

如果周期性脉冲波加到 RC 积分器，如图 15-12 所示，输出波形取决于电路的时间常数与输入脉冲频率之间的关系。电容响应输入脉冲进行充电和放电，电容充电和放电的量则与电路的时间常数和输入频率有关。

如果脉冲宽度和脉冲之间的间隔都大于等于五倍时间常数，电容将在输入波形的每个周期内都完全充电和完全放电，这种情况如图 15-12 所示。

当脉冲宽度及脉冲间隔时间短于五倍时间常数，如图 15-13 所示的方波，电容将不完全充电和不完全放电，我们现在将研究这种情况对积分器输出电压的影响。

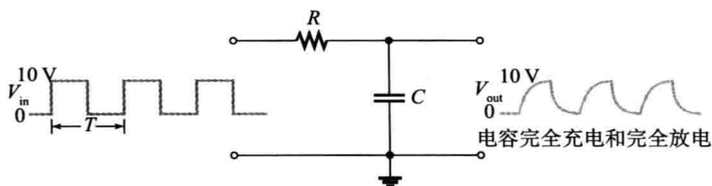


图 15-12　重复性脉冲波输入的 RC 积分器

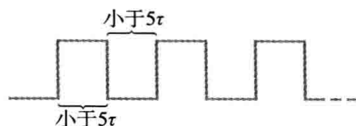


图 15-13　不允许积分器电容完全充电或放电的输入波形

为了演示，我们采用充放电时间常数等于10V方波输入的脉冲宽度的 RC 积分器，如图15-14所示。这样选择可以简化分析，并演示积分器在这种条件下的基本行为。因为我们已经知道一个时间常数间隔 RC 电路充电63.2%，所以这时我们无需太关注准确的时间常数值。

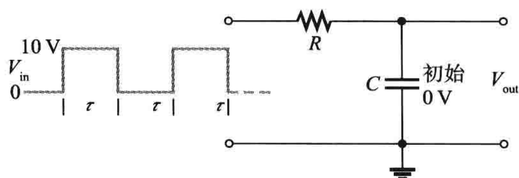


图15-14　周期为两倍时间常数的方波输入的积分器（$T=2\tau$）

假设图15-14中电容初始不带电荷，我们来观察在一个接一个脉冲输入基础上的输出电压，分析结果如图15-15所示。

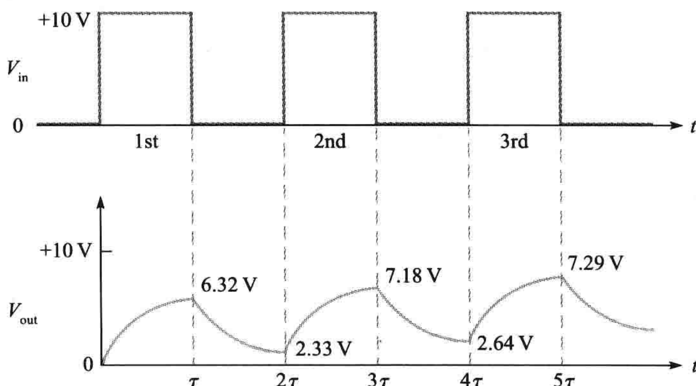


图15-15　图15-14中初始无充电积分器的输入与输出

第一个脉冲　在第一个脉冲期间，电容充电，输出电压达到6.32V，即10V的63.2%，如图15-15所示。

第一个和第二个脉冲之间　电容放电，电压下降到放电开始时的36.8%：0.368×6.32V=2.33V。

第二个脉冲　电容电压从2.33V开始，往10V增长63.2%，总充电区间为10V−2.33V = 7.67V，电容电压将增加7.67V的63.2%，即4.85V，因此，第二个脉冲结束时输出电压为2.33V+ 4.85V =7.18V，如图15-15所示，注意平均值的建立。

第二个和第三个脉冲之间　这段时间电容放电，电压下降到第二个脉冲结束时的36.8%：0.368×7.18V=2.64V。

第三个脉冲　第三个脉冲开始时电容电压为2.64V，电容充电从2.64V到10V的63.2%：0.632×（10V−2.64V）=4.65V，因此，第三个脉冲结束时输出电压为2.64V+ 4.65V =7.29V。

小贴士　*在示波器上观察波形时，设置示波器为DC耦合，不能使用AC耦合，原因是AC耦合有一串联电容对低频脉冲造成失真，DC耦合还能够观察脉冲的直流电平。*

15.3.1　稳态时间响应

在前面的讨论中，输出电压逐步建立，然后开始趋于平稳，输出电压建立起最终值的99%大约需要 5τ 时间，而不管该时间间隔期间可能发生多少个脉冲，这一时间间隔就是电路的瞬态时间。一旦输出电压达到输入电压的平均值，就达到了稳态（steady-state）条件，只要周期输入继续，输出就继续维持。基于前三个脉冲得到的近似值如图15-16所示。

例子中电路的瞬态时间是从第一个脉冲开始到第三个脉冲结束的时间，第三个脉冲结束的电容电压为7.29V，约是最终值的99%。

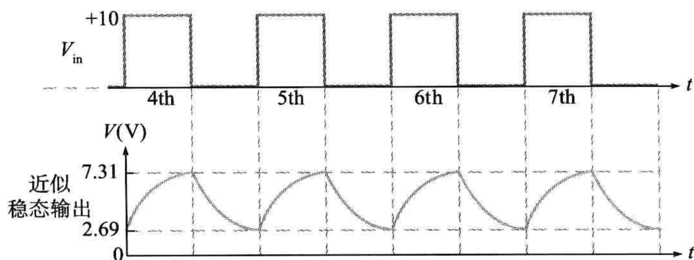
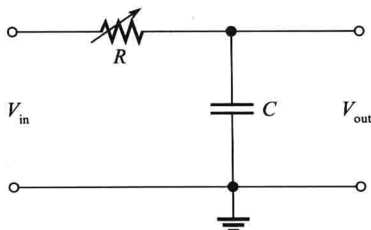


图 15-16 5τ 后输出达到稳定状态并稳定在标记值

15.3.2 时间常数增大的影响

如果用可调电阻增大积分器的 RC 时间常数，如图 15-17 所示，输出电压将如何变化？随着时间常数的增大，电容在脉冲期间充电量减少，在两个脉冲间的放电也减少，结果是对于时间常数的增大输出电压的波动更小，如图 15-18 所示。



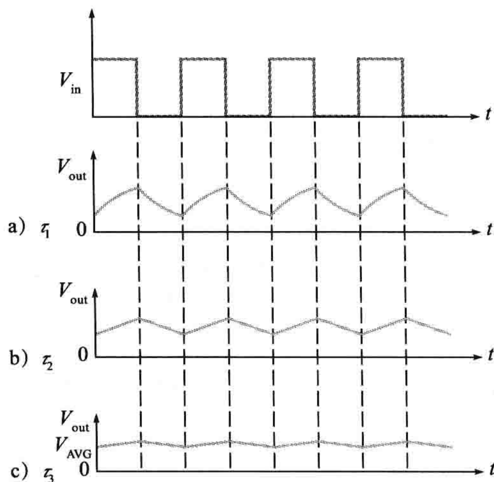


图 15-17 用可调电阻控制积分器时间常数　　图 15-18 增大时间常数对积分器输出的影响（$\tau_3 > \tau_2 > \tau_1$）

当时间常数与脉冲宽度相比变得非常长时，输出电压近似为恒定直流电压，如图 15-18c 所示，这个值就是输入的平均值，对于方波，它等于幅度的一半。

【例 15-3】 假设电容初始未充电，试确定图 15-19 中积分器电路对应前两个脉冲输入的输出电压的波形。

解： 首先计算电路的时间常数。

$$\tau = RC = 4.7\text{k}\Omega \times 0.01\mu\text{F}$$
$$= 47\mu\text{s}$$

很明显，时间常数远大于输入脉冲宽度或两个脉冲之间的间隔（注意输入不是方波），因此，在这种情况下，必须使用指数公式，分析起来相对困难。下面的求解需仔细。

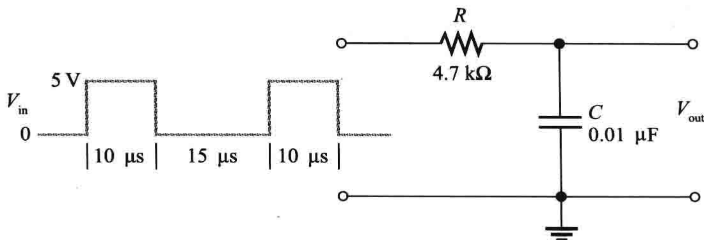


图 15-19

1）第一个脉冲期的计算：因为C充电，所以采用增长的指数式（9-15），其中$V_F=5V$，t等于脉冲宽度$10\mu s$。因此，

$$v_C=V_F(1-e^{-t/RC})=5V\times(1-e^{-10\mu s/47\mu s})=958mV$$

该结果如图15-20a所示。

2）第一个脉冲与第二个脉冲之间隔的计算：因为C放电，所以采用衰减指数式（9-16），由于C从第一个脉冲结束时的值开始放电，故V_i为958mV，放电时间为$15\mu s$，因此，

$$v_C=V_ie^{-t/RC}=958mV\times e^{-15\mu s/47\mu s}=696mV$$

该结果如图15-20b所示。

3）第二个脉冲期的计算：在第二个脉冲起点输出电压为696mV，第二脉冲期间电容再次充电，这次不是从零伏开始，前面的充电和放电已经有696mV电压，处理这个情况必须使用一般的指数公式（9-13）。

$$v=V_F+(V_i-V_F)e^{-t/\tau}$$

利用这个公式，可以计算第二个脉冲结束时电容两端的电压。

$$\begin{aligned}v_c&=V_F+(V_i-V_F)e^{-t/RC}\\&=5V+(696mV-5V)e^{-10\mu s/47\mu s}\\&=1.52V\end{aligned}$$

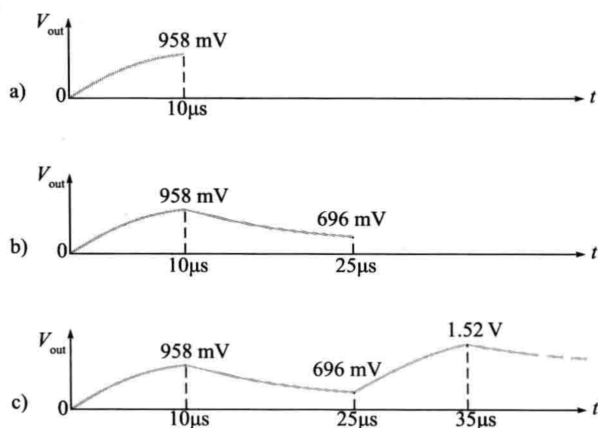


图 15-20

该结果如图15-20c所示。

注意，输出波形建立在连续输入脉冲的基础上，约5τ后将达到稳定状态，在确定的最大值和最小值之间波动，平均值等于输入的平均值。可以按本例演示的方式进一步作分析。

相关问题：求第三个脉冲开始时的V_{out}。

Multisim 仿真

打开Multisim仿真文件E15-03，按最大值、最小值及平均值测量稳态输出波形。

系统举例 15-1　扫频测试

通信系统对于发射机和接收机的频率响应具有特殊要求。为了测试发射机或接收机的频率响应，示波器设置成实时观察频率响应。通过把示波器设成x-y模式，将示波器横轴（时基）转换成频率基，这样示波器就能绘制出被测单元对于测试信号的响应。扫频测试系统的方框图如图15-21所示。

扫频发生器提供测试信号，由产生调频（FM）信号的三个模块组成，通过积分器（时间常数$\gg T$的RC电路）将方波发生器产生的脉冲转换为三角波，三角波经过放大用于改变压控振荡器（VCO）的频率，同时，三角波与频率变化同步地作示波器x-轴偏移，这就使得示波器时基变成了频率基，测试信号在两个特定的射频之间连续变化，被测单元是通信系统的一个调试部分。

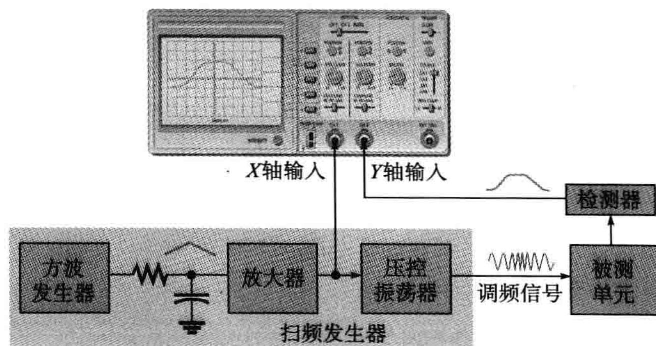


图15-21　扫频测试

被测单元是通信系统的一部分，它对调频信号的响应由其频率响应确定，检测到的输出（去除射频信号）并在示波器上观察到的包络显示了频率响应，可以在观察的同时实时调节被测单元。

本节测试题

1. 周期性脉冲波加在输入端时，允许 RC 积分器电容完全充电和放电的条件是什么？
2. 如果电路的时间常数与方波输入的脉冲宽度相比非常小，试问输出波形看起来像什么？
3. 当 5τ 大于输入方波的脉冲宽度时，输出电压建立起恒定平均值所需的时间称为什么？
4. 请定义稳态响应。
5. 当输入为周期远小于 1τ 的方波时，描述 RC 积分器的输出。
6. 在系统举例 15-1 的扫频测量中积分器的作用是什么？

15.4　*RC* 微分器的单脉冲响应

根据时间响应，从电阻两端输出电压的串联 RC 电路称为*微分器*。根据频率响应，这种特殊 RC 电路称为高通滤波器，微分器这个术语源于数学功能，在某些条件下，这种电路近似于实现数学的微分运算。

学习完本节内容，应该能够

- 分析单脉冲输入的 RC 微分器；
- 描述输入脉冲上升沿的响应；
- 在各种脉冲宽度与时间常数关系下，确定脉冲期间及脉冲结束时的响应。

图 15-22 显示了脉冲输入的 RC 微分器，除了输出是从电阻两端取出而不是从电容两端取出以外，微分器与积分器相同，电容以 RC 时间常数决定的速率按指数充电，微分器电阻电压的形状由电容的充电和放电作用确定。

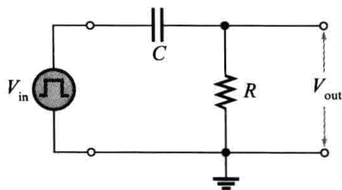


图 15-22　连接脉冲发生器的 RC 微分器

15.4.1　脉冲响应

为了理解微分器输出电压的变化形状，必须考虑下面几种情况：

1）对上升沿的响应；

2）上升沿与下降沿之间的响应；

3）对下降沿的响应。

我们假设脉冲上升沿到来前电容未充电，脉冲到来前输入为零伏，因此，电容和电阻两端都是零电压，如图 15-23a 所示。

对脉冲上升沿的响应　同样假设施加 10V 脉冲输入，上升沿到达时，A 点的电压升至 +10V，电容两端的电压不能突变，所以电容表现为瞬时短路，因此，如果 A 点的电压瞬间升至 +10V，B 点的电压也必须瞬时跳到 +10V。在上升沿瞬间电容电压保持为零，而电容电压就是从 A 点到 B 点的电压。

B 点对地的电压就是电阻两端的电压（输出电压），因此，对脉冲上升沿响应的输出电压突变到 +10V，如图 15-23b 所示。

$t_W \geq 5\tau$ 时时的脉冲期响应　在脉冲处于上升沿和下降沿之间的高电平期间，电容充电。当脉冲宽度大于等于五倍时间常数（$t_W \geq 5\tau$）时，电容有时间完全充电。

随着电容两端的电压按指数增强，根据基尔霍夫电压定律（$v_C + v_R = v_{in}$），任意时刻电容

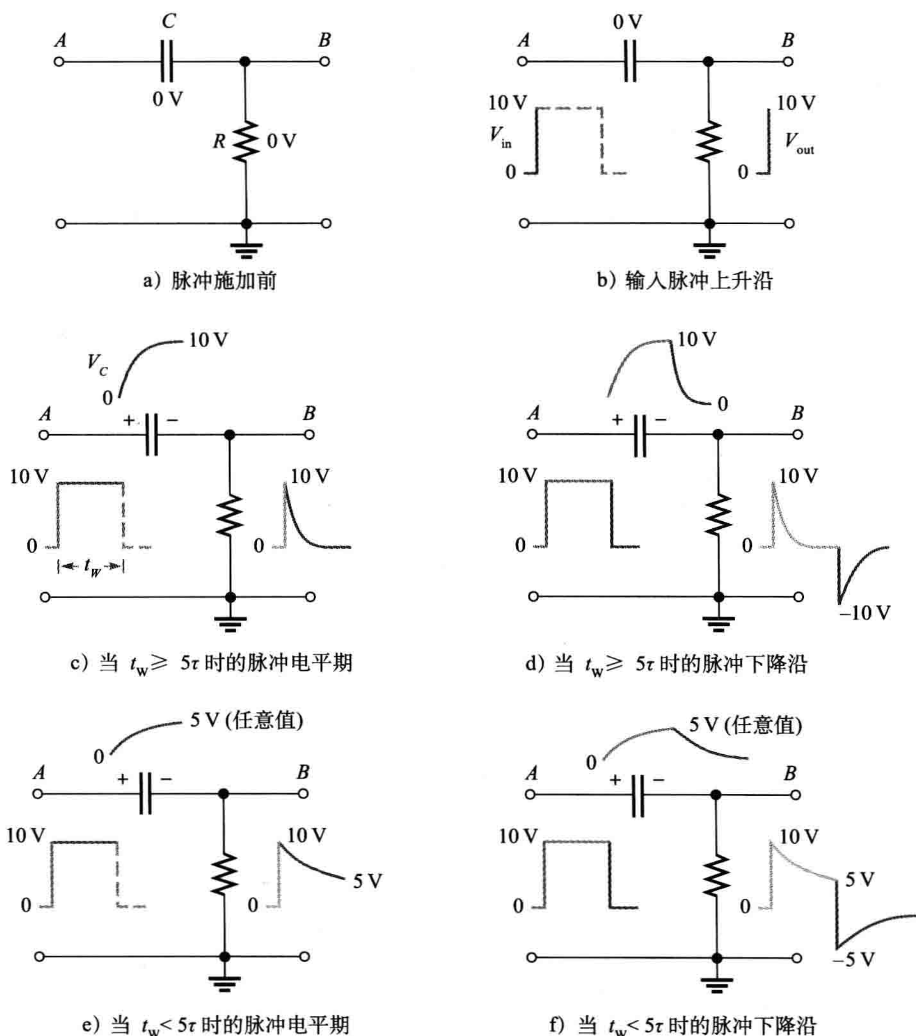


图 15-23　微分器在两种条件（$t_W \geqslant 5K$ 和 $t_W < 5\tau$）下对单脉冲的响应举例。图中未画出接在输入端的脉冲发生器，仅给出脉冲

电压和电阻电压之和必须等于电源电压，因此，电阻两端的电压按指数下降，直至电容完全充电（这里是＋10V）时降到零伏。这部分响应如图 15-23c 所示。

$t_W \geqslant 5\tau$ 时的脉冲下降沿响应　我们先研究在脉冲结束时电容完全充电的情况（$t_W \geqslant 5\tau$），参考图 15-23d，在下降沿，输入脉冲突然从＋10V 回到零。在下降沿前的瞬间，电容已充电到 10V，所以 A 点的电压为＋10V 而 B 点的电压为 0V。电容两端的电压不能突变，当下降沿 A 点的电压从＋10V 转换到 0V 时，B 点的电压必须同样从 0V 跳变到－10V，在下降沿的瞬间，电容两端的电压保持为 10V。

现在电容开始按指数放电，结果电阻电压从－10V 按指数曲线向 0V 变化，如图 15-23d 所示。

$t_W < 5\tau$ 时的脉冲期响应　当脉冲宽度小于五倍时间常数（$t_W < 5\tau$）时，电容没有时间完全充电，其部分充电量取决于时间常数与脉冲宽度的关系。

由于电容电压不能完全达到＋10V，在脉冲结束时电阻电压不会到零。例如，如果电容在

脉冲期充电到＋5V，电阻电压将降到＋5V，如图 15-23e 所示。

$t_W < 5\tau$ 时的脉冲下降沿响应　我们现在研究在脉冲结束时电容部分充电的情况（$t_W < 5\tau$），例如，如果电容充电到＋5V，在下降沿前瞬间电阻电压也是 5V，因为电容电压加电阻电压必须等于＋10V，如图 15-23e 所示。

下降沿到来时，A 点的电压从＋10V 变为零，由于电容电压不能突变到下降沿，结果 B 点的电压从＋5V 跳变为－5V，如图 15-23f 所示。到下降沿后，电容随即开始放电到零，结果电阻电压从－5V 变化到零，如图中所示。

15.4.2　*RC* 微分器的单脉冲响应总结

总结本节的一个好方法是观察时间常数从一个极端（5τ 远小于脉冲宽度）到另一个极端（5τ 远大于脉冲宽度）变化时微分器的一般输出波形，这些情况如图 15-24 所示。在图 15-24a 中，输出由窄的正和负"尖峰"组成，这些短脉冲在许多系统中是有用的，它提供一种称为"触发"的定时信号。在图 15-24e 中，输出接近输入的形状。这两个极端之间的情况如图 15-24b、图 15-24c 及图 15-24d 所示。

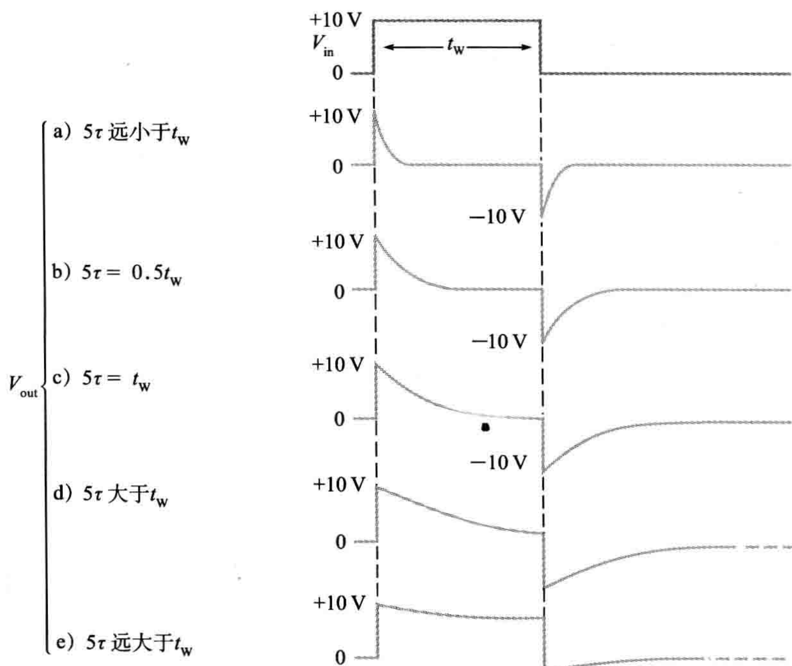


图 15-24　时间常数变化对 *RC* 微分器输出电压形状的影响

【例 15-4】　求图 15-25 中电路的输出电压。

解： 首先计算时间常数。

$$\tau = RC = 15\text{k}\Omega \times 120\text{pF} = 1.8\mu\text{s}$$

这种情况下 $t_W > 5\tau$，所以电容 9μs 达到完全充电（脉冲结束前）。

在上升沿，电阻电压跳到＋5V，然后在脉冲结束前按指数下降到零。在下降沿，电阻电压跳变到－5V，然后按指数回到零。输出电压即电阻电压及其形状如图 15-26 所示。

相关问题：如果图 15-25 中 $R=18\text{k}\Omega$、$C=47\text{pF}$，求输出电压。

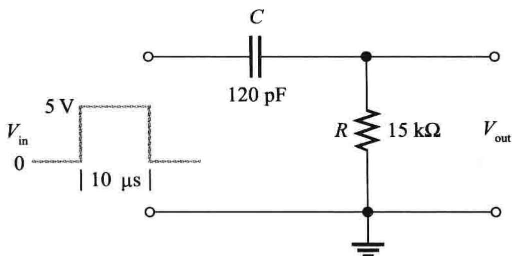


图 15-25

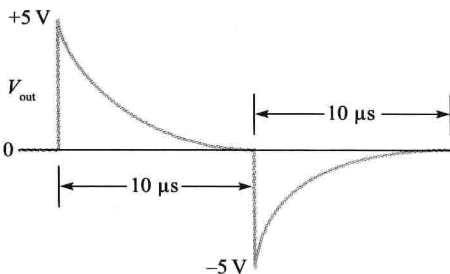


图 15-26

【例 15-5】 确定图15-27中微分器的输出电压的波形。

解：首先计算时间常数。

$$\tau = 2.2\text{k}\Omega \times 1.0\mu\text{F} = 2.2\text{ms}$$

在上升沿，电阻电压瞬间跳到+25V，由于脉冲宽度为5ms，脉冲期电容充电约2.27个时间常数，因而不能达到完全充电，所以，必须使用衰减指数公式（9-16）计算脉冲结束时的输出电压值。

$$v_{out} = V_i e^{-t/RC} = 25\text{V} \times e^{-5\text{ms}/2.2\text{ms}} = 2.58\text{V}$$

其中，$V_i=25\text{V}$，$t=5\text{ms}$，该计算得到5ms脉冲宽度间隔结束时刻的电阻电压。

在下降沿，电阻电压瞬间从+2.58V跳到−22.4V（跳跃25V），结果输出电压波形如图15-28所示。

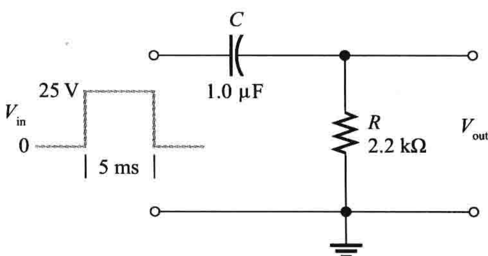


图 15-27

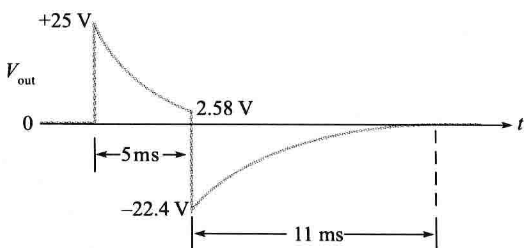


图 15-28

相关问题：如果在图15-27中添加R为1.5kΩ，试求脉冲结束时刻的电压。

本节测试题

1. 请说明当$5\tau=0.5t_W$时10V输入脉冲的微分器输出。
2. 试问在什么条件下微分器的输出脉冲形状最像输入脉冲？
3. 当5τ远小于输入脉冲宽度时微分器输出看上去像什么？
4. 如果微分电路的电阻电压在15V输入脉冲结束时下降到+5V，试问对应输入的下降沿电阻电压将会跳到什么负值？

15.5 *RC*微分器的重复脉冲响应

本节将把上一节*RC*微分器对单脉冲的响应推广到重复脉冲。

学习完本节内容，应该能够

- 分析重复脉冲输入的*RC*微分器；

- 确定脉冲宽度小于五倍时间常数的响应。

如果周期性脉冲波加到 RC 微分电路，还是考虑两种可能的情况：$t_W \geqslant 5\tau$ 或 $t_W < 5\tau$。图 15-29显示了 $t_W = 5\tau$ 时的输出。随着时间常数的减小，输出的正部和负部都变窄。注意输出的平均值为零，波形具有相等的正部和负部，波形的平均值就是其直流分量。由于电容阻隔直流，输入的直流成分不能通过到达输出。

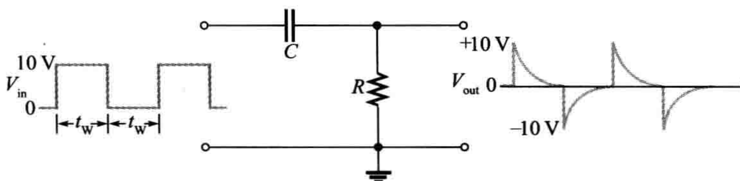


图 15-29　$t_W = 5\tau$ 时微分器响应举例

图 15-30 显示了 $t_W < 5\tau$ 时的稳态输出。随着时间常数的增大，输出的正部和负部都变宽。对于时间常数非常长的情形，输出趋近于输入形状，但平均值为零。

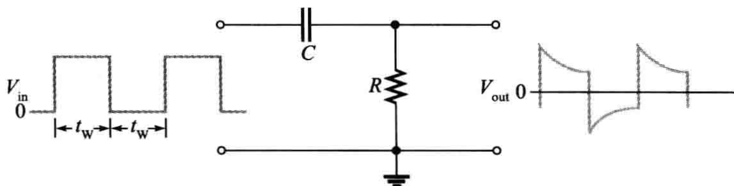


图 15-30　$t_W < 5\tau$ 时微分器响应举例

重复波形分析

类似积分器，微分器达到稳态的时间为 5τ。为了演示响应，我们以时间常数等于脉冲宽度为例，这样，我们不必关注电路时间常数的值，因为我们知道，脉冲期（1τ）电阻电压将下降到其最大值的 36.8%。假设图 15-31 中电容开始时未充电，我们来观察在脉冲一个接一个输入基础上的输出电压，分析结果如图 15-32 所示。

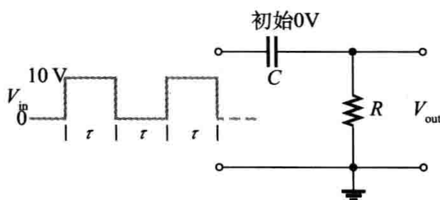


图 15-31　$T = 2\tau$ 时的 RC 微分器

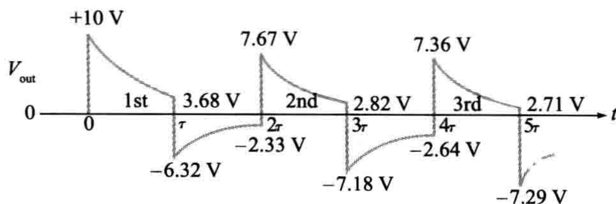


图 15-32　图 15-31 中电路瞬态时间内的微分器输出波形

第一个脉冲　在上升沿，输出电压瞬时跳变到＋10V，然后电容部分充电到 10V 的 63.2%，即 6.32V，所以输出电压必然下降到 3.68V，如图 15-32 所示。

在下降沿，输出瞬时负向跳跃 10V 到 6.32V，因为 3.68V－10V＝－6.32V。

第一个和第二个脉冲之间　电容放电到 6.32V 的 36.8%，即 2.33V，故电阻电压从－6.32V必须增大至－2.33V，为什么呢？因为在下一个脉冲到来前的时刻输入电压为零，因此，v_C和v_R的和必须是零（+2.33V－2.33V = 0）。记住，根据基尔霍夫电压定律，任意时刻都有 $v_C + v_R = v_{in}$。

第二个脉冲 在上升沿，输出电压瞬时正向跳变10V，从−2.33V到7.67V，然后到脉冲结束时电容充电0.632×(10V−2.33V) = 4.85V，所以电容电压从2.33V增大到2.33V+4.85V=7.18V。输出电压下降到0.368×7.67V=2.82V。

在下降沿，输出瞬时负向从2.82V跳变到−7.18V，如图15-32所示。

第二个和第三个脉冲之间 电容放电7.18V的36.8%，即2.64V。所以输出电压从−7.18V开始增大到−2.64V，因为在第三个脉冲到来前瞬时电容电压与电阻电压之和必须为零（输入为零）。

第三个脉冲 在上升沿，输出电压瞬时正向跳变10V，从−2.64V到+7.36V，然后电容充电0.632×(10V−2.64V) = 4.65V到2.64V+4.65V=+7.29V，结果输出电压下降到0.368×7.36V=2.71V。在下降沿，输出瞬时从+2.71V跳变到−7.29V。

第三个脉冲后，五倍时间常数过去，输出电压近似为稳态，所以图15-32的波形继续从正最大值（约+7.3V）到负最大值（−7.3V）变化，平均值为零。

系统举例15-2 看门狗定时器

许多系统需要不间断的监测，以便在电源出现故障时立即采取行动。一种对特定条件监控的电路称为看门狗定时器，它对于监控电路有着丰富多彩的描述，通常是指可以采取纠正措施的电路。对于电源故障监控的情况，通常电容器要有足够存储的能量以便在系统关闭之前采取措施，采取的措施可以是切换至备用电源、保存文件或拉响由电池供电的警报等。看门狗定时器电路种类繁多，包括一些内量的集成电路。

本例中，看门狗定时器监测输入电源，在发生故障时输出负向触发信号，由触发信号启动纠正动作。该电路的关键部分是两个微分电路，图15-33显示了看门狗定时器的基本电路。

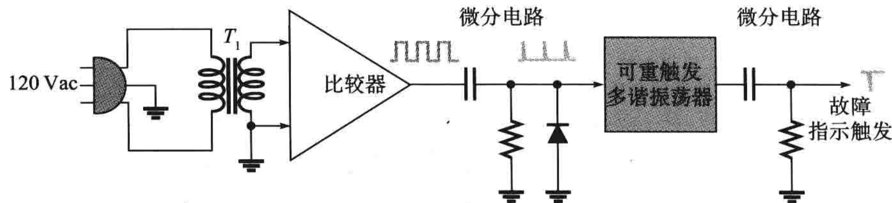


图15-33 监控电源的看门狗定时器电路

电路的工作过程如下：由T_1将交流电源变换到低电压，低压交流信号与接地比较，当交流信号高于接地电平时比较器输出高电平信号，而当交流信号低于接地电平时比较器输出低电平信号，从而产生一个方波。第一个微分电路和二极管产生一串触发信号，频率为电源频率。触发信号送到可重触发多谐振荡器，只要输入的触发信号正常即输出直流高电平，如果电源出现故障，输出即降至地电平，第二个微分电路则将该下降转换成负向的触发信号，用以启动纠正措施。

本节测试题

1. 当周期脉冲波形加到输入端时，允许*RC*微分器完全充电和放电的条件是什么？
2. 如果电路时间常数与输入方波的脉冲宽度相比非常小，试问输出波形像什么？
3. 在稳态微分器输出电压的平均值等于多少？
4. 说明微分器在看门狗定时器中的用途。

15.6 *RL*积分器的脉冲输入响应

根据时间响应，从电阻两端输出电压的*RL*串联电路称为积分器。本节我们只讨论单脉冲响应，但可以像*RC*积分器那样推广到重复脉冲输入，虽然*RL*积分器的波形与*RC*积分器的

波形相似，但是 RL 积分器却不常用，因为电感一般比电容昂贵，而且其绕组电阻会对电路产生不利的影响。

学习完本节内容，应该能够

- 分析 RL 积分器的工作原理；
- 确定单脉冲输入的响应。

图 15-34 显示了 RL 积分器，从电阻两端输出波形，在等价条件下，输出波形与 RC 积分器形状相同，但 RC 积分器是从电容两端输出。

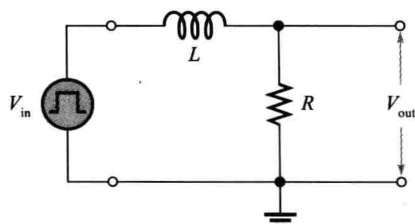


图 15-34　连接脉冲发生器的 RL 积分器

我们知道，理想脉冲的每个边沿可认为是一次瞬变，在分析 RL 积分器对脉冲输入响应时，将借助两个电感特性：

1）电感对于电流的瞬变表现为开路，对直流表现为短路（理想情况下）。

2）电感中的电流不能瞬变——输入电平改变时只能按指数变化。

RL 积分器的单脉冲响应

当脉冲发生器接到 RL 积分器输入端时，电压脉冲从低电平跳变至高电平，电感阻碍电流的突变，结果是电感表现为开路，在上升沿瞬间所有输入电压都加到它两端，图 15-35a 显示了这种情况。

上升沿后，电流增强，输出电压跟随电流指数增大，如图 15-35b 所示，如果瞬态时间比脉冲宽度短，则电流能够达到最大值 V_p/R（本例中脉冲幅度 $V_p=10\text{V}$）。

当脉冲从高电平跳变至低电平时，线圈两端产生反极性的感应电压，以试图维持电流等于 V_p/R，输出电压开始按指数下降，如图 15-35c 所示。

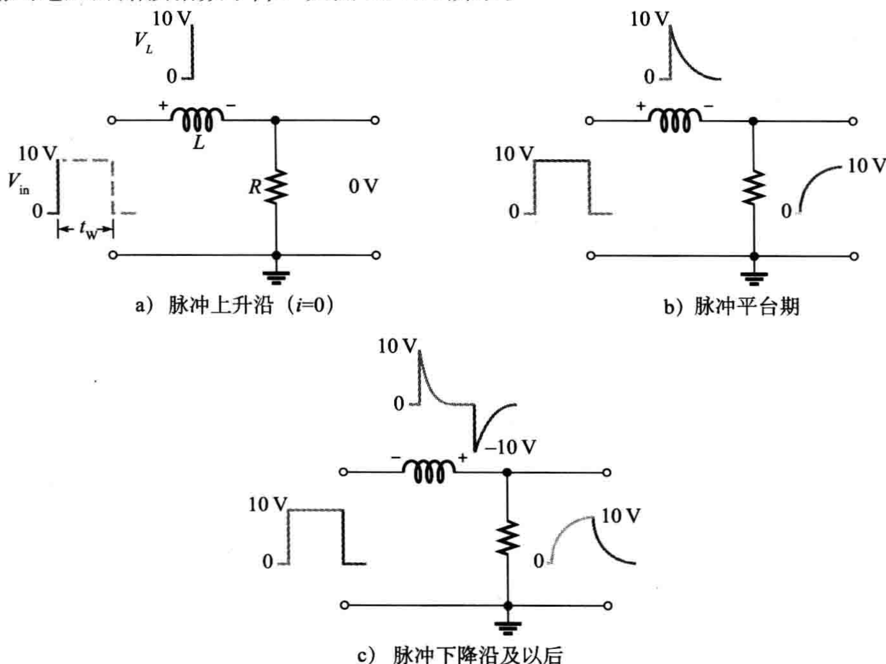


图 15-35　RL 积分器（$t_W>5\tau$）的脉冲响应演示。图中未画出接在输入端的脉冲发生器，仅给出脉冲

输出的确切形状取决于 L/R 时间常数，图 15-36 总结了时间常数与脉冲宽度之间的各种关系，可以发现，就输出波形而言，这一 RL 电路的响应与 RC 积分器是一致的。L/R 时间常数对输入脉冲宽度的关系与本章前面讨论的 RC 时间常数作用相同。例如，当 $t_W<5\tau$ 时，输出电压将不会达到可能的最大值。

【例 15-6】　当单脉冲输入时，试确定图 15-37 中积分器的最大输出电压。

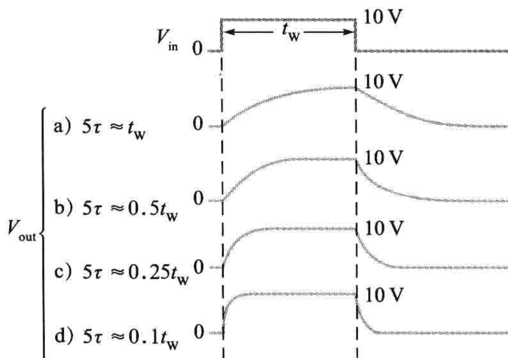


图 15-36　积分器输出脉冲形状随时间常数变化的演示

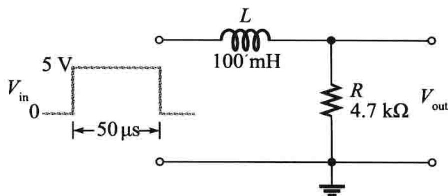


图　15-37

解： 计算时间常数。

$$\tau=\frac{L}{R}=\frac{100\text{mH}}{4.7\text{k}\Omega}=21.3\mu\text{s}$$

由于脉冲宽度是 50μs，电感磁场增大（激磁）约 2.35τ（50μs/21.3μs=2.35），利用公式（11-6）计算电压。

$$v=V_F+(V_i-V_F)e^{-Rt/L}$$

V_i 为零，最大输出电压出现在脉冲结束时刻。因此，

$$V_L=V_F(1-e^{-t/\tau})=5\text{V}\times(1-e^{-50\mu s/21.3\mu s})=4.52\text{V}$$

相关问题：试问为使脉冲结束时刻输出电压达到 5V，R 必须取什么值？

Multisim 仿真

打开 Multisim 仿真文件 E15-06，用空格键触发脉冲发生器，确认解答中所做的计算。

【例 15-7】　一个脉冲加到图 15-38 中的 RL 积分器，确定各个波形和 I、V_R、V_L 的值。

解： 电路的时间常数为

$$\tau=\frac{L}{R}=\frac{5.0\text{mH}}{1.5\text{k}\Omega}=3.33\mu\text{s}$$

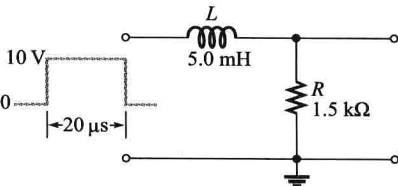


图　15-38

由于 5τ=16.7μs 小于 t_W，所以电流将达到最大值并保持到脉冲结束时刻。

在脉冲上升沿，$i=0\text{A}$，$v_R=0\text{V}$，$v_L=10\text{V}$。

积分器表现为开路，输入电压全部呈现在 L 两端。

在脉冲期间，i 在 16.7μs 内按指数增大到 $\frac{V_p}{R}=\frac{10\text{V}}{1.5\text{k}\Omega}=6.67\text{mA}$，$v_R$ 在 16.7μs 内按指数增大到 10V，v_L 在 16.7μs 内按指数衰减到零。

在下降沿时刻，$i=6.67\text{mA}$，$v_R=10\text{V}$，$v_L=-10\text{V}$。下降沿后，i 在 16.7μs 内按指数衰减到零，v_R 在 16.7μs 内按指数衰减到零，v_L 在 16.7μs 内按指数衰减到零。

波形如图 15-39 所示。

相关问题：如果图 15-38 中输入脉冲幅度增大到 20V，试问最大输出电压是多少？

【例 15-8】 宽度 10μs 的 10V 脉冲加到图 15-40 中的积分器，求脉冲期间输出电压将达到的电平值，如果电源内阻为 300Ω，试问输出衰减到零所需的时间是多少？请画出输出电压波形。

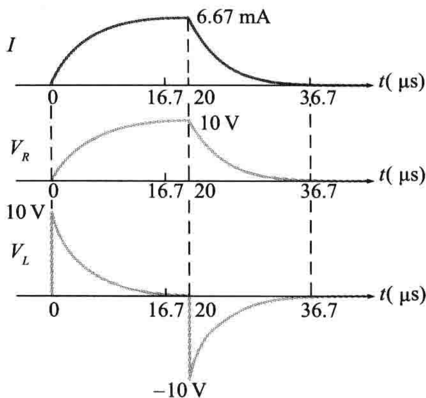


图 15-39

解： 线圈通过 300Ω 电源电阻加 4.7kΩ 外部电阻激磁，时间常数为

$$\tau = \frac{L}{R_{\text{tot}}} = \frac{50\text{mH}}{4700\Omega + 300\Omega} = \frac{50\text{mH}}{5.0\text{k}\Omega} = 10\mu\text{s}$$

这种情况脉冲宽度正好等于 τ，输出 V_R 在 1τ 内将达到全输入幅度的约 63.2%，因此，输出电压在脉冲结束时刻为 6.3V。

脉冲过后，电感通过 300Ω 电源电阻加 4.7kΩ 电阻去磁，输出电压在 5τ 内衰减到零。

$$5\tau = 5 \times 10\mu\text{s} = 50\mu\text{s}$$

输出电压如图 15-41 所示。

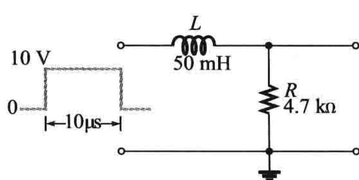


图 15-40

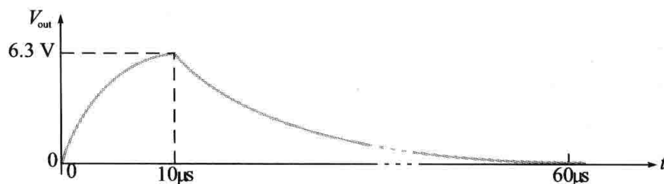


图 15-41

相关问题：在图 15-40 中为使输出电压在脉冲期达到输入电平，试问 R 的最大值大约为多少？

本节测试题

1. 试问 RL 积分器从哪个元件两端输出电压？
2. 当脉冲加到 RL 积分器时，为了使输出电压达到输入幅度，必须满足什么条件？
3. 试问在什么条件下输出电压与输入脉冲的形状相似？

15.7 RL 微分器的脉冲输入响应

根据时间响应，从电感两端输出电压的串联 RL 电路称为微分器，本节我们只讨论单脉冲的响应，但是可以像 RC 微分器那样扩展到重复脉冲。

学习完本节内容，应该能够

- 分析 RL 微分器的工作原理；
- 确定单脉冲输入的响应。

RL 微分器的单脉冲响应

图 15-42 显示了输入端接脉冲发生器的 RL 微分器。

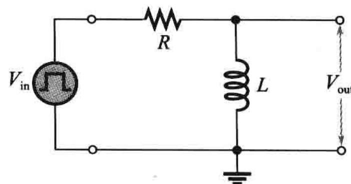


图 15-42　接脉冲发生器的 RL 微分器

脉冲到来前的初始时刻电路中没有电流，当输入脉冲到来从低电平跳变至高电平时，电感将阻碍电流的变化，我们

知道，这时电感电压与输入电压大小相等极性相反，结果是在上升沿瞬间 L 看似开路，输入电压全部降在 L 两端，如图 15-43a所示（脉冲幅度为 10V)。

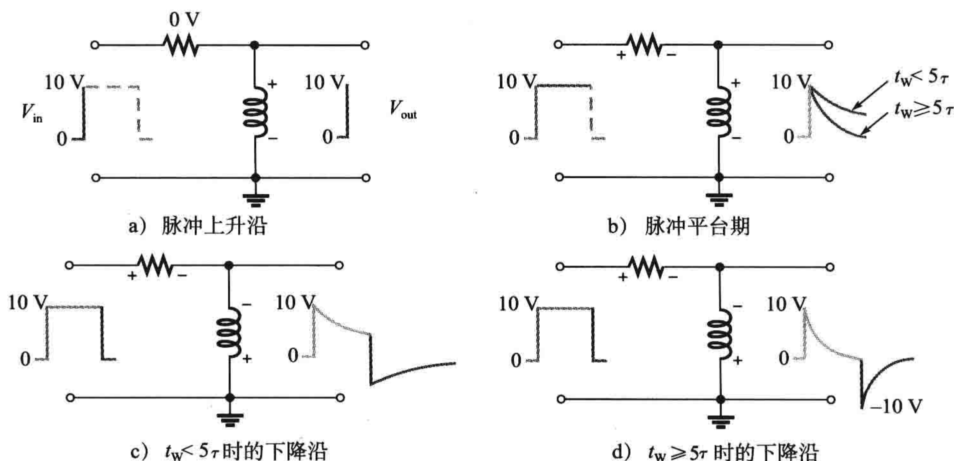


图 15-43 两种时间常数的 RL 微分器响应演示。图中未画出接在输入端的脉冲发生器，仅给出脉冲

脉冲期间电流按指数增强，结果电感电压下降，如图 15-43b所示。我们知道，下降速率由 L/R 时间常数决定。脉冲下降沿到来时，电感通过产生如图 15-43c 所示方向的感应电压试图维持电流不变，这一反应可看做电感电压的负向突变，如图 15-43c 和图 15-43d 所示。

图 15-43c 和图 15-43d 显示出两种可能的情况，图 15-43c 中 5τ 大于输入脉冲的宽度，输出电压没有时间衰减到零。而图 15-43d 中 5τ 小于等于输入脉冲宽度，输出电压在脉冲结束前已衰减到零，这种情况在下降沿发生－10V 的瞬变。

请记住，仅就输入和输出波形而言，RL 积分器和微分器与 RC 积分器和微分器功能是一样的。

时间常数与脉冲宽度之间各种关系的 RL 微分器响应总结如图 15-44 所示，与图 15-24 的 RC 微分器比较可以发现，两者的响应是一致的。

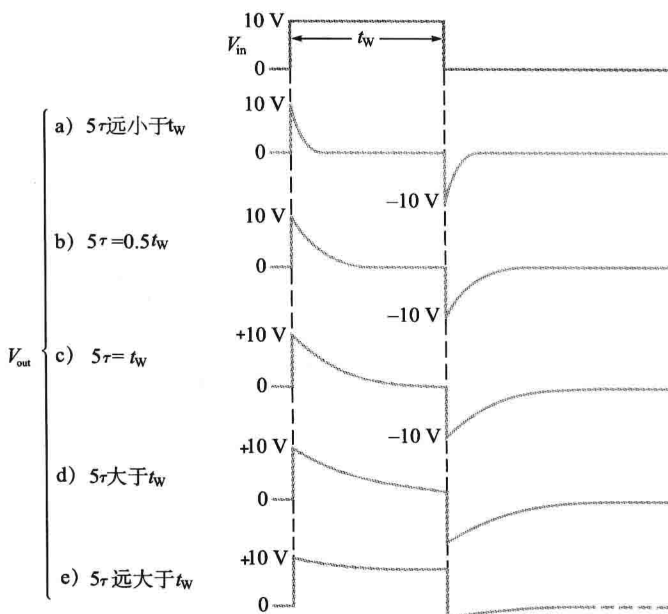


图 15-44 输出脉冲的形状随时间常数变化的演示

【例 15-9】 试画出图 15-45 中 RL 微分器输出电压的波形。

解： 首先计算时间常数。

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{200\mu\text{H}}{10\text{k}\Omega} = 20\text{ns}$$

这种情况下 $t_W = 5\tau$，所以在脉冲结束时刻输出将衰减到零。

在上升沿，电感电压跳变到＋5V，然后按指数向零衰减，在下降沿到来瞬时近似到达零。

在输入的下降沿，电感电压跳变到－5V，然后逐步回到零。输出波形如图 15-46 所示。

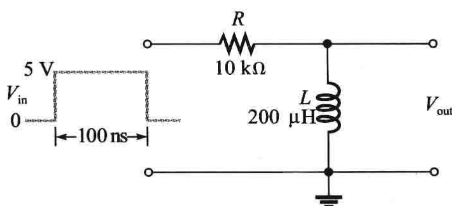


图 15-45

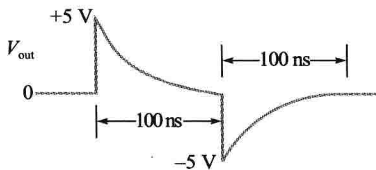


图 15-46

相关问题：如果输入脉冲宽度减小到 50ns，试求图 15-45 中的输出电压。

【例 15-10】 求图 15-47 中 RL 微分器输出电压的波形。

解： 首先计算时间常数。

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{20\text{mH}}{10\text{k}\Omega} = 2\mu\text{s}$$

在上升沿，电感电压瞬间跳变到＋25V，这是指数衰减的初始值，终值为零（假设一直衰减），任意时刻电感上电压的指数公式为式（11-6），即

$$v = V_F + (V_i - V_F)e^{-Rt/L}$$

代入终值 0 得到指数衰减公式：

$v_L = V_i e^{-t/\tau} = 25\text{V} \times e^{-5\mu s/2\mu s} = 25\text{V} \times e^{-2.5} = 2.05\text{V}$

这是电感电压在 $5\mu s$ 输入脉冲结束时的结果。

在下降沿，输出电压从＋2.05V 跳变到－22.95V（负向跳跃 25V），完整的输出波形如图 15-48所示。

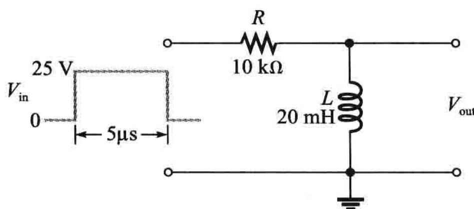


图 15-47

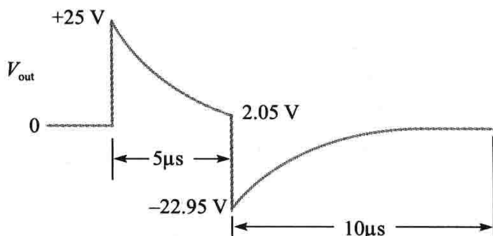


图 15-48

相关问题：为使图 15-47 中输入脉冲结束时 V_{out} 达到零，R 必须取什么值？

本节测试题

1. 试问 RL 微分器的输出在哪个元件两端取？
2. 试问在什么条件下输出脉冲形状最近似输入脉冲？
3. 如果 RL 微分器的电感电压在＋10V 脉冲结束时下降到＋2V，试问输入的下降沿输出响应电压将跳到什么负电压？

15.8 积分器和微分器的应用

虽然在很多不同类型的应用中都能找到积分器和微分器，但本节仅讨论三个基本应用。

学习完本节内容，应该能够

- 讨论积分器和微分器的应用；
- 描述 RC 积分器在定时电路中的应用；

- 描述如何用积分器将脉冲波形转换为直流；
- 描述如何用微分器作触发脉冲发生器。

15.8.1 定时电路

*RC*积分器可用于定时电路为各种用途设置特定时间间隔，可通过改变时间常数来调节时间间隔。例如，图15-49a中的*RC*积分器电路用于提供电源闭合开关时间与某个由阈值电路激发的事件时间之间的延时，阈值电路设计用来对输入电压达到某个特定电平做出响应，我们现在不必纠缠阈值电路如何工作，后续课程中将会学到这种电路。

开关合下时，电容开始以*RC*时间常数设定的速率充电，经过一段时间后，电容电压达到阈值，触发（接通）电路去激活电路或设备，根据用途可以是电动机、继电器或灯泡。把*R*做成可调电阻能够产生可变的延时，这种电路在许多系统中有用如雷达系统，用来调节某些特征，类似"杂波滤波器"。图15-49b用波形演示了这种作用。

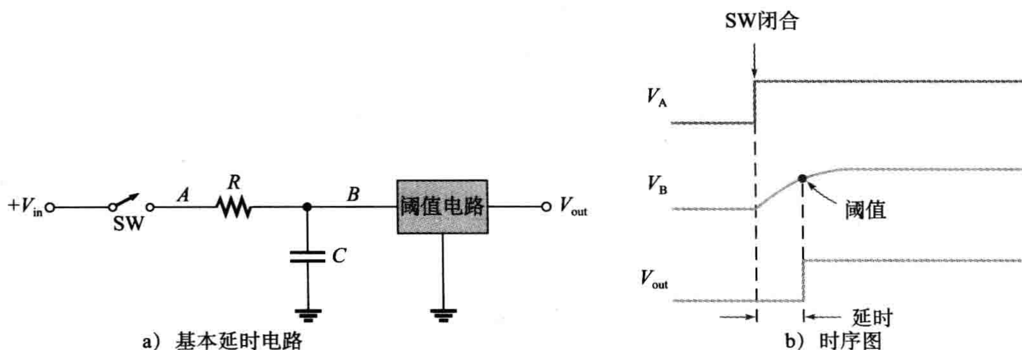


图15-49 *RC*积分器的基本延时应用

【例15-11】 图15-49a所示的电路中，$V_{in}=9V$，$R=10M\Omega$，$C=0.47\mu F$，假设阈值电压为5V，试问延时为多少？

解：利用指数公式（9-15），求解时间如下：

$$v = V_F(1-e^{-t/RC}) = V_F - V_F e^{-t/RC}$$

$$V_F - v = V_F e^{-t/RC}$$

$$e^{-t/RC} = \frac{V_F - v}{V_F}$$

等式两边取自然对数（ln）得

$$-\frac{t}{RC} = \ln\left(\frac{V_F - v}{V_F}\right)$$

$$t = -RC\ln\left(\frac{V_F - v}{V_F}\right)$$

V_F是C将充电到的终值，等于V_{in}，代入数值解t得

$$t = -10M\Omega \times 0.47\mu F\ln\left(\frac{9V-5V}{9V}\right) = -10M\Omega \times 0.47\mu F\ln\left(\frac{4V}{9V}\right) = 3.8s$$

相关问题：对于$V_{in}=24V$、$R=10k\Omega$、$C=1500pF$，求图15-49中电路的延时。

15.8.2 脉冲波形-直流转换器

利用时间常数与脉冲周期相比极长的积分电路，可以将脉冲波形转换为其平均值的恒定直

流，如图 15-50a 所示。实际上，由于电容仍有少许的充电和放电，输出会有轻微的纹波，随着时间常数变长这种纹波将变小，因而更接近恒定的电平，如图 15-50b 所示。从正弦响应来看，这个电路就是一个低通滤波器。

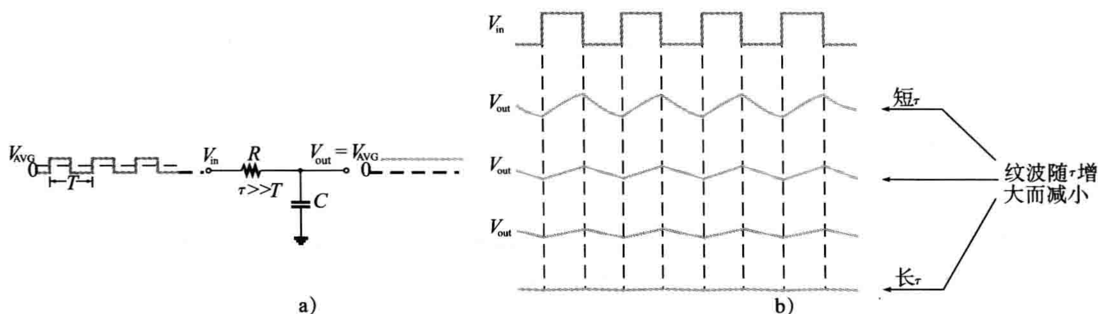


图 15-50　长时间常数积分器作为脉冲-直流转换器

15.8.3　触发脉冲发生器与波形整形

微分器电路可以用来产生正负极性持续时间很短的脉冲（尖峰），如我们在系统举例 15-2 中所见。当时间常数比输入脉冲宽度短时，微分器在每个输入的正向跳变边沿产生一个正尖峰，而在每个输入的负向跳变边沿产生一个负尖峰，如图 15-51 所示。可以使用二极管去除正或负的触发脉冲。

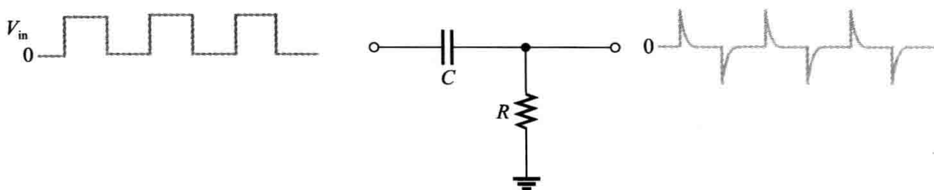


图 15-51　极短时间常数微分器产生正、负尖峰

把输入改成周期与时间常数相比较长的三角波，就构成了波形整形电路，这次的输出是一个方波，表示了三角波的上升斜率。这一想法如图 15-52 所示。该电路在方波的上升时间和幅度之间需要折中，时间常数短，方波上升得快，但是幅度就小。

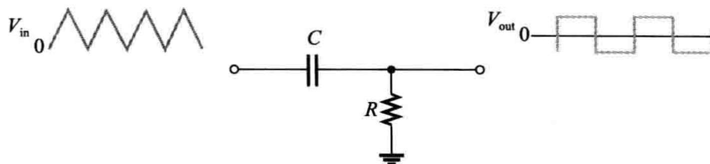


图 15-52　三角波-方波转换电路。电路时间常数比周期长

本节测试题

1. 试问在图 15-49 所示的电路中怎么才能增大延时？
2. 请确认在图 15-50 中减小 R 的阻值将增大还是减小输出中的纹波量。
3. 图 15-51 中的微分器必须具有什么特性才能在输出产生持续时间非常短的尖峰？

15.9　故障排除

本节我们利用脉冲输入的 RC 电路来演示在选定情况下常见元件故障的影响，相应内容很容易与 RL 电路联系起来。

学习完本节内容，应该能够

- 对 RC 积分器和 RC 微分器进行故障排除；
- 识别电容开路的影响；
- 识别电容短路的影响；
- 识别电阻开路的影响。

15.9.1　电容开路

如果 RC 积分器中电容开路，则输出具有和输入一样的波形，如图 15-53a 所示。如果 RC 微分器中电容开路，则输出为零，因为它通过电阻接地，如图 15-53b 所示。

15.9.2　电容短路

如果 RC 积分器中电容短路，则输出接地，如图 15-54a 所示。如果 RC 微分器中电容短路，则输出与输入相同，如图 15-54b 所示。

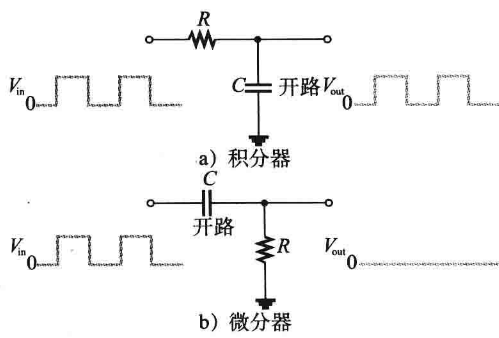


图 15-53　开路电容的影响举例

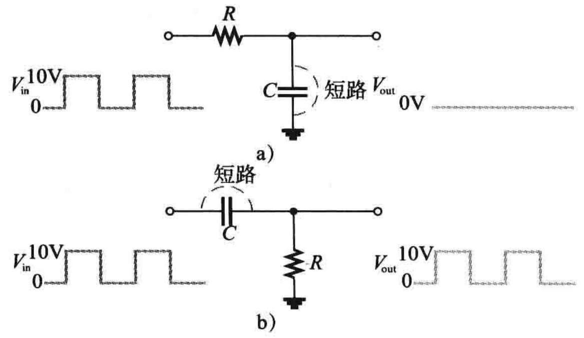


图 15-54　电容短路的影响举例

15.9.3　电阻开路

如果 RC 积分器中电阻开路，则电容没有了放电通路，理想情况下将保持其所拥有的电荷，实际情况下任何电荷都会逐步泄漏掉，或电容会通过连接在输出端的测量仪器缓慢放电，如图 15-55a 所示。

如果 RC 微分器中电阻开路，则除了直流电平不同以外，输出看上去就和输入一样，这时电容必须通过极高的示波器电阻充电和放电，如图 15-55b 所示。

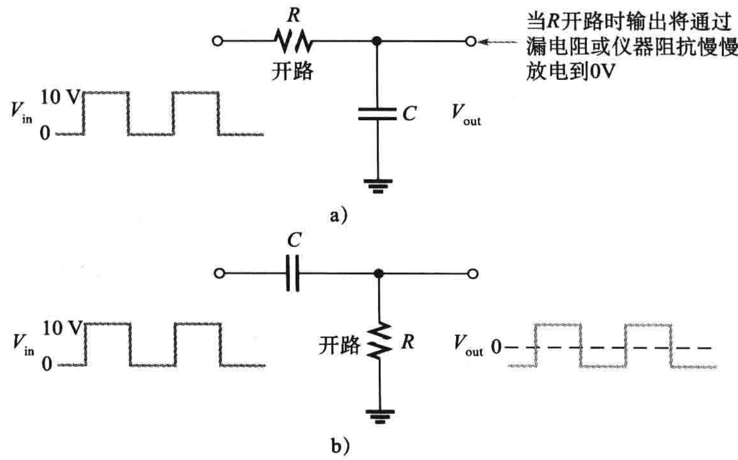


图 15-55　电阻开路的影响举例

本节测试题

1. 方波输入的 RC 积分器输出为零，试问这个问题可能的原因是什么？
2. 如果积分器的电容开路，试问对方波输入的输出是什么？
3. 如果微分器的电容短路，试问对方波输入的输出是什么？

本章小结

- RC 积分器在电容两端取输出电压。
- RC 微分器在电阻两端取输出电压。
- RL 积分器在电阻两端取输出电压。
- RL 微分器在电感两端取输出电压。
- 积分器中，输入的脉冲宽度（t_W）远小于瞬态时间时，输出电压趋近于等于输入平均值的恒定电平。
- 积分器中，输入的脉冲宽度远大于瞬态时间时，输出电压趋近于输入形状。
- 微分器中，输入的脉冲宽度远小于瞬态时间时，输出电压趋近于输入形状，但平均值为零。
- 微分器中，输入的脉冲宽度远大于瞬态时间时，输出电压由出现在输入脉冲前沿和后沿的窄的正向和负向尖峰构成。
- RC 积分器可以用来设置特定的延时。

关键术语

微分器（Differentiator） 一种输出接近输入数学导数的电路。

积分器（Integrator） 一种输出接近输入数学积分的电路。

稳态（Steady state） 经过初始的瞬态时间以后，电路出现的平衡状态。

瞬态时间（Transient time） 约等于五倍时间常数的时间间隔。

是非测验题

1. RC 电路的瞬态时间与时间常数相同。
2. 如果脉冲宽度大于等于 5τ，则脉冲输入的 RC 电路中电容能够完全充电。
3. 若脉冲输入的 RC 电路电源电压增大，则时间常数将增大。
4. 在一定条件下，RC 积分器的输出具有与输入相同的最大、最小电压。
5. 在一定条件下，RC 积分器的输出可等于输入的平均电压。
6. 脉冲加到 RC 微分器后的瞬间，输出将近似等于输入的峰值。
7. RL 积分器在电感两端输出。
8. 如果 RL 微分器的电感开路，输出将为零。
9. RL 微分器的时间常数与电阻成反比。
10. 能够由方波产生出正负触发脉冲的电路是微分器。

自测题

1. RC 积分器的输出取自
   (a) 电阻　(b) 电容
   (c) 电源　(d) 线圈
2. 脉冲宽度等于一个时间常数的 10V 输入脉冲加到 RC 积分器，则电容充电到
   (a) 10V　(b) 5V
   (c) 6.3V　(d) 3.7V
3. 脉冲宽度等于一个时间常数的 10V 输入脉冲加到 RC 微分器，则电容充电到
   (a) 6.3V　(b) 10V
   (c) 5V　(d) 3.7V
4. 在 RC 积分器中，下列情况输出脉冲非常近似于输入
   (a) τ 远大于脉冲宽度
   (b) τ 等于脉冲宽度
   (c) τ 小于脉冲宽度
   (d) τ 远小于脉冲宽度
5. 在 RC 微分器中，下列情况输出脉冲非常近似于输入
   (a) τ 远大于脉冲宽度
   (b) τ 等于脉冲宽度
   (c) τ 小于脉冲宽度

(d) τ 远小于脉冲宽度

6. 下列情况微分器输出电压的正部和负部最大

   (a) $5\tau < t_W$ (b) $5\tau > t_W$

   (c) $5\tau = t_W$ (d) $5\tau > 0$

7. RL 积分器的输出取自

   (a) 电阻 (b) 线圈

   (c) 电源 (d) 电容

8. RL 微分器的最大电流是

   (a) $I = \frac{V_p}{X_L}$

   (b) $I = \frac{V_p}{Z}$

   (c) $I = \frac{V_p}{R}$

9. 下列情况 RL 微分器的电流达到可能的最大值

   (a) $5\tau = t_W$ (b) $5\tau < t_W$

   (c) $5\tau > t_W$ (d) $\tau = 0.5t_W$

10. 如果两个时间常数相等的 RC 和 RL 微分器并排放在一起，加入相同的输入脉冲

    (a) RC 微分器输出脉冲最宽

    (b) RL 微分器输出尖峰最窄

    (c) 一个输出按指数增大，另一个输出按指数减小

    (d) 两个输出波形看不出差别

习题

基本习题

15.1 节

1. 积分器由 $R=2.2\text{k}\Omega$ 和 $C=0.047\mu\text{F}$ 串联组成，试问其时间常数是多少？
2. 对下列每种情况确定积分电路的电容完全充电所需的时间：

   (a) $R=47\Omega$，$C=47\mu\text{F}$

   (b) $R=3300\Omega$，$C=0.015\mu\text{F}$

   (c) $R=22\text{k}\Omega$，$C=100\text{pF}$

   (d) $R=4.7\text{M}\Omega$，$C=10\text{pF}$
3. 需要积分器的时间常数约 6ms，如果 $C=0.22\mu\text{F}$，试问 R 必须用什么标准值？
4. 为了使习题 3 中积分器的电容脉冲期内完全充电，试问最小的脉冲宽度必须是多少？

15.2 节

5. 20V 脉冲加到 RC 积分器，脉冲宽度等于一个时间常数，假设电容初始未充电，试问脉冲期电容充电到什么电压？
6. 对下列值重做习题 5：

   (a) 2τ (b) 3τ (c) 4τ (d) 5τ
7. 若 5τ 远小于 10V 方波输入的脉冲宽度，试画出积分器输出电压的大致形状。若 5τ 远大于脉冲宽度，重画积分器输出电压的大致形状。
8. 求图 15-56 所示单脉冲输入积分器的输出电压，对于重复脉冲，试问需要多长时间电路达到稳态？

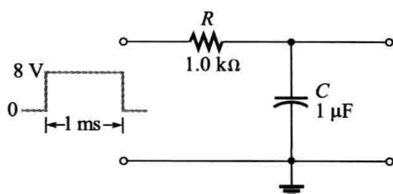


图 15-56

15.3 节

9. 画出图 15-57 积分器的输出，表明最大电压。

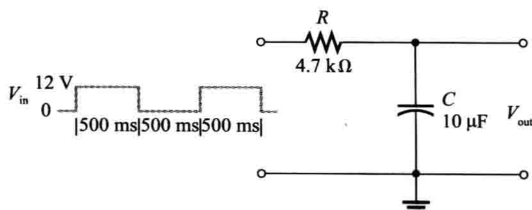


图 15-57

10. 幅度为 1V、占空比为 25% 的 1kHz 脉冲波加到 $\tau=25\mu\text{s}$ 的积分器，C 初始未充电，试画出最初三个脉冲的输出电压。
11. 试问如图 15-58 所示方波输入的 RC 积分器稳态输出电压是多少？

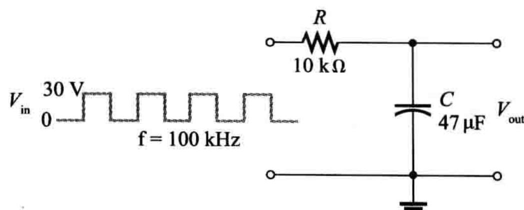


图 15-58

15.4 节

12. 对于 RC 微分器重做习题 7。
13. 重画图 15-56 所示的电路使之成为微分器，重做习题 8。

15.5 节

14. 画出图 15-59 中微分器的输出，表明最大电压。

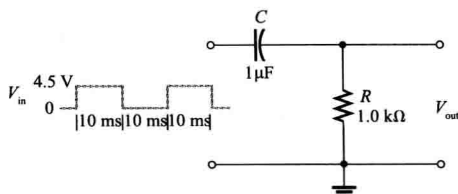


图 15-59

15. 试问如图 15-60 所示方波输入的 RC 微分器稳态输出电压是多少？

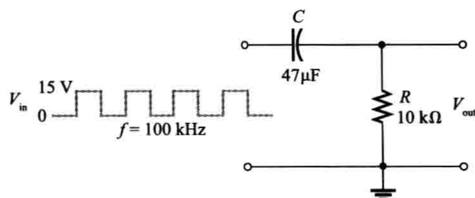


图 15-60

15.6 节

16. 求图 15-61 中电路加单脉冲输入时的输出电压。

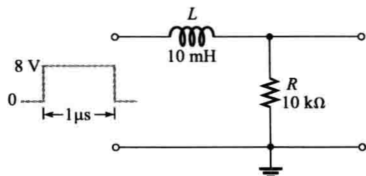


图 15-61

17. 画出图 15-62 中积分器的输出，表明最大电压。

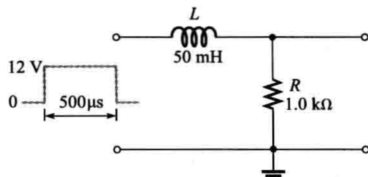


图 15-62

15.7 节

18. (a) 试问图 15-63 中的 τ 是多少？
    (b) 画出输出电压。
19. 若将 $t_W = 250\mu s$、$T = 600\mu s$ 的周期性脉冲波形加到图 15-63 中的电路，试画出输出波形。

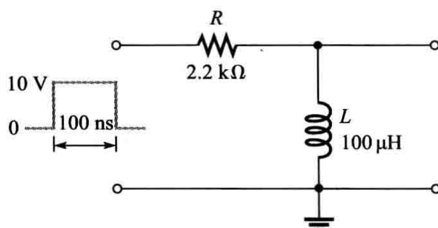


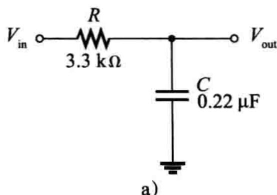
图 15-63

15.8 节

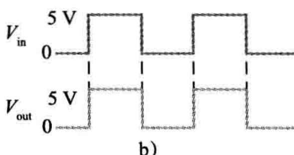
20. 对于 $R = 22k\Omega$、$C = 0.001\mu F$、$V_{in} = 10V$，试问图 15-49 中电路开关闭合后 $440\mu s$ 时 B 点的瞬时电压是多少？
21. 假设时间常数远大于输入信号的周期，理想情况下 RC 积分器输入为 12V 方波时的输出是多少？

15.9 节

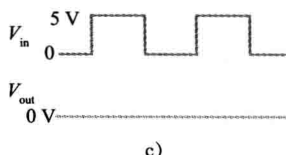
22. 图 15-64a 电路中，V_{in} 是周期为 8ms 的方波，试针对图 15-64b 和 15-64c 所示的两组波形确定最可能出现的故障。
23. 图 15-65a 电路中，V_{in} 是周期为 8ms 的方波，试针对图 15-65b 和图 15-65c 所示的两组波形，如果有故障，确定最可能出现的故障。



a)

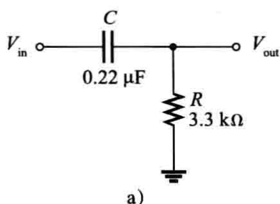


b)

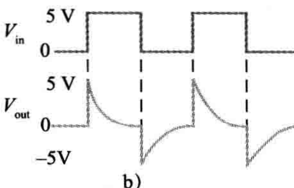


c)

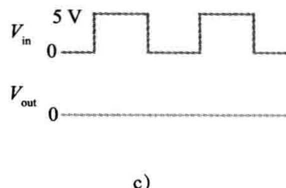
图 15-64



a)



b)



c)

图 15-65

高级习题

24. (a) 试问图15-66中的 τ 是多少？
    (b) 画出输出电压。

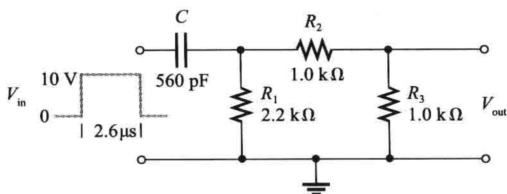


图　15-66

25. (a) 试问图15-67中的 τ 是多少？
    (b) 画出输出电压。

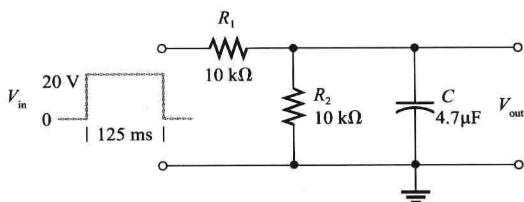


图　15-67

26. 确定图15-68中的时间常数，试问电路是积分器还是微分器？

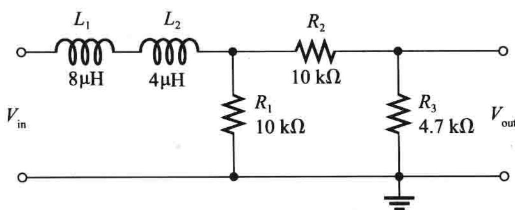
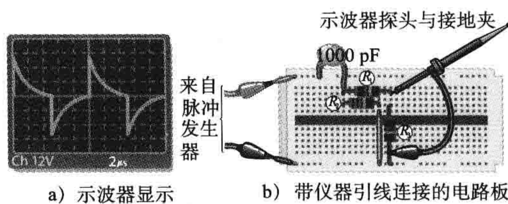


图　15-68

27. 在类似图15-49的延时电路中，如果输入幅度为5V，电路的阈值为2.5V，试问产生1s延时的时间常数是多少？

28. 画出图15-69中电路的原理图，确定示波器显示是否正确。其中，电阻 R_1 的色环颜色分别为：棕、黑、红、金；电阻 R_2 的色环颜色分别为：红、红、红、金；电阻 R_3 的色环颜色分别为：棕、黑、红、金。



a) 示波器显示　　b) 带仪器引线连接的电路板

图　15-69

29. 请给出校准系统举例15-1中作为频率的时基的建议方法。

30. 请解释为什么系统举例15-2中最后输出是负向触发而不是正向触发。

Multisim 仿真故障排除习题

31. 打开文件P15-31，测试电路，如果存在故障，请识别故障。

32. 打开文件P15-32并测试电路，如果存在故障，请识别故障。

33. 确定文件P15-33中的电路是否存在故障，如果有，请识别故障。

34. 识别文件P15-34电路中的任意故障元件。

各节测试题答案

15.1节

1. 积分器是一个 *RC* 串联电路，脉冲输入，在电容两端输出。
2. 加在输入端的电压使电容充电，输入端的零电压使电容放电。

15.2节

1. 当 $5\tau \leqslant t_W$ 时积分器输出达到满幅度。
2. $V_{out}=0.632\times 1V=0.632V$；$t_{disch}=5\tau=51.7ms$。
3. 见图15-70。

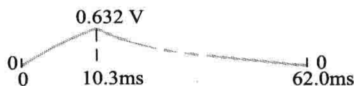


图　15-70

4. *C* 不能完全充电。
5. 当 $5\tau \ll t_W$（5τ 远小于 t_W）时输出近似为输入形状。

15.3节

1. 当 $5\tau \leqslant t_W$ 及 $5\tau \leqslant$ 脉冲间隔时，积分器电容将完全充电与放电。
2. 输出与输入形状相似。
3. 瞬态时间。
4. 稳态是瞬态时间过去以后的响应。
5. 输出是等于输入平均值的直流电压。
6. 积分器将方波转换为三角波，沿 x 轴移动光束。

15.4节

1. 见图15-71。
2. 当 $5\tau \gg t_W$ 时输出近似为输入。
3. 输出由正、负尖峰构成。
4. $V_R=+5V-15V=-10V$

15.5 节

1. 当 $5\tau \leqslant t_W$ 及 $5\tau \leqslant$ 脉冲间隔时 C 完全充电和放电。

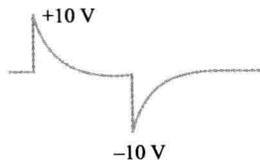


图 15-71

2. 输出由正、负尖峰构成。
3. $V_{out}=0V$
4. 第一个微分器将比较器输出的方波转换为一串短脉冲（尖峰），只要电源不切断就连续重触发单稳态电路，第二个微分器检测单稳态在失去电源时的下降沿。

15.6 节

1. 在电阻两端输出。
2. 当 $5\tau \leqslant t_W$ 时输出达到输入幅度。
3. 当 $5\tau \ll t_W$ 时输出近似为输入。

15.7 节

1. 在电感两端输出。
2. 当 $5\tau \gg t_W$ 时输出近似为输入。
3. $V_{out}=2V-10V=-8V$

15.8 节

1. 增大时间常数来增大延时。
2. 减小 R 将增大纹波。
3. 非常短的时间常数将产生非常短的尖峰。

15.9 节

1. RC 积分器零输出表明可能是电容短路、电阻开路、无电源电压或接触断开。
2. 积分电容开路导致输出与输入一致。
3. 微分电容短路导致输出与输入一致。

例题中相关问题答案

例 15-1　8.65V

例 15-2　24.7V

例 15-3　1.10V

例 15-4　见图 15-72。

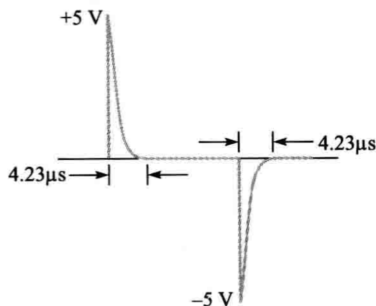


图 15-72

例 15-5　892mV

例 15-6　10kΩ

例 15-7　20V

例 15-8　24.7kΩ（假设 $R_s=300\Omega$）

例 15-9　见图 15-73。

例 15-10　20kΩ

例 15-11　3.5μs

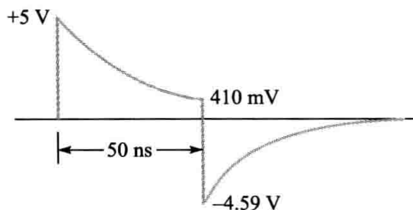


图 15-73

是非测验题答案

1.F　2.T　3.F　4.T　5.T　6.T　7.F　8.F　9.T　10.T

自测题答案

1.（b）　2.（c）　3.（a）　4.（d）　5.（a）　6.（a）　7.（a）　8.（c）　9.（b）　10.（d）

附录 A

标准电阻值表

电阻容差（±%）

0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%	0.1% 0.25% 0.5%	1%	2% 5%	10%
10.0	10.0	10	10	14.7	14.7	—	—	21.5	21.5	—	—	31.6	31.6	—	—	46.4	46.4	—	—	68.1	68.1	68	68
10.1	—	—	—	14.9	—	—	—	21.8	—	—	—	32.0	—	—	—	47.0	—	47	47	69.0	—	—	—
10.2	10.2	—	—	15.0	15.0	15	15	22.1	22.1	22	22	32.4	32.4	—	—	47.5	47.5	—	—	69.8	69.8	—	—
10.4	—	—	—	15.2	—	—	—	22.3	—	—	—	32.8	—	—	—	48.1	—	—	—	70.6	—	—	—
10.5	10.5	—	—	15.4	15.4	—	—	22.6	22.6	—	—	33.2	33.2	33	33	48.7	48.7	—	—	71.5	71.5	—	—
10.6	—	—	—	15.6	—	—	—	22.9	—	—	—	33.6	—	—	—	49.3	—	—	—	72.3	—	—	—
10.7	10.7	—	—	15.8	15.8	—	—	23.2	23.2	—	—	34.0	34.0	—	—	49.9	49.9	—	—	73.2	73.2	—	—
10.9	—	—	—	16.0	—	16	—	23.4	—	—	—	34.4	—	—	—	50.5	—	—	—	74.1	—	—	—
11.0	11.0	11	—	16.2	16.2	—	—	23.7	23.7	—	—	34.8	34.8	—	—	51.1	51.1	51	—	75.0	75.0	75	—
11.1	—	—	—	16.4	—	—	—	24.0	—	24	—	35.2	—	—	—	51.7	—	—	—	75.9	—	—	—
11.3	11.3	—	—	16.5	16.5	—	—	24.3	24.3	—	—	35.7	35.7	—	—	52.3	52.3	—	—	76.8	76.8	—	—
11.4	—	—	—	16.7	—	—	—	24.6	—	—	—	36.1	—	36	—	53.0	—	—	—	77.7	—	—	—
11.5	11.5	—	—	16.9	16.9	—	—	24.9	24.9	—	—	36.5	36.5	—	—	53.6	53.6	—	—	78.7	78.7	—	—
11.7	—	—	—	17.2	—	—	—	25.2	—	—	—	37.0	—	—	—	54.2	—	—	—	79.6	—	—	—
11.8	11.8	—	—	17.4	17.4	—	—	25.5	25.5	—	—	37.4	37.4	—	—	54.9	54.9	—	—	80.6	80.6	—	—
12.0	—	12	12	17.6	—	—	—	25.8	—	—	—	37.9	—	—	—	56.2	—	—	—	81.6	—	—	—
12.1	12.1	—	—	17.8	17.8	—	—	26.1	26.1	—	—	38.3	38.3	—	—	56.6	56.6	56	56	82.5	82.5	82	82
12.3	—	—	—	18.0	—	18	18	26.4	—	—	—	38.8	—	—	—	56.9	—	—	—	83.5	—	—	—
12.4	12.4	—	—	18.2	18.2	—	—	26.7	26.7	—	—	39.2	39.2	39	39	57.6	57.6	—	—	84.5	84.5	—	—
12.6	—	—	—	18.4	—	—	—	27.1	—	27	27	39.7	—	—	—	58.3	—	—	—	85.6	—	—	—
12.7	12.7	—	—	18.7	18.7	—	—	27.4	27.4	—	—	40.2	40.2	—	—	59.0	59.0	—	—	86.6	86.6	—	—
12.9	—	—	—	18.9	—	—	—	27.7	—	—	—	40.7	—	—	—	59.7	—	—	—	87.6	—	—	—
13.0	13.0	13	—	19.1	19.1	—	—	28.0	28.0	—	—	41.2	41.2	—	—	60.4	60.4	—	—	88.7	88.7	—	—
13.2	—	—	—	19.3	—	—	—	28.4	—	—	—	41.7	—	—	—	61.2	—	—	—	89.8	—	—	—
13.3	13.3	—	—	19.6	19.6	—	—	28.7	28.7	—	—	42.2	42.2	—	—	61.9	61.9	62	—	90.9	90.9	91	—
13.5	—	—	—	19.8	—	—	—	29.1	—	—	—	42.7	—	—	—	62.6	—	—	—	92.0	—	—	—
13.7	13.7	—	—	20.0	20.0	20	—	29.4	29.4	—	—	43.2	43.2	43	—	63.4	63.4	—	—	93.1	93.1	—	—
13.8	—	—	—	20.3	—	—	—	29.8	—	—	—	43.7	—	—	—	64.2	—	—	—	94.2	—	—	—
14.0	14.0	—	—	20.5	20.5	—	—	30.1	30.1	30	—	44.2	44.2	—	—	64.9	64.9	—	—	95.3	95.3	—	—
14.2	—	—	—	20.8	—	—	—	30.5	—	—	—	44.8	—	—	—	65.7	—	—	—	96.5	—	—	—
14.3	14.3	—	—	21.0	21.0	—	—	30.9	30.9	—	—	45.3	45.3	—	—	66.5	66.5	—	—	97.6	97.6	—	—
14.5	—	—	—	21.3	—	—	—	31.2	—	—	—	45.9	—	—	—	67.3	—	—	—	98.8	—	—	—

注：表中数值通常可乘以 0.1、1、10、100、1k 和 1M。

附录B
电容器颜色编码与标记

B.1 电容器颜色

有些电容器采用颜色编码标识，电容器使用的颜色代码基本上和电阻器使用的色码相同，只是在公差标识上会有一些变化。基本色码如表 B-1 所示，图 B-1 显示了一些典型的色码电容器。

表 B-1 典型的电容器色码组合（皮法）

颜色	数字	乘数	容差	颜色	数字	乘数	容差
黑色	0	1	20%	紫色	7		
棕色	1	10	1%	灰色	8		
红色	2	100	2%	白色	9		
橙色	3	1000	3%	金色		0.1	5%（JAN①）
黄色	4	10 000		银色		0.01	10%
绿色	5	100 000	5%（EIA①）	无色			20%
蓝色	6	1 000 000					

① EIA 表示电子行业协会标准；JAN 表示海陆军联合标准（军方标准）。

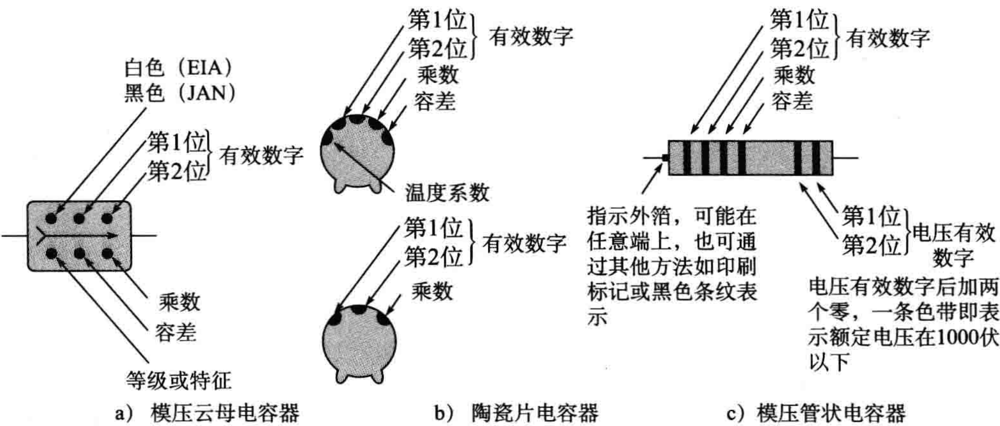


图 B-1 典型色码电容器

B.2 标记系统

图 B-2 所示的电容器具有一定的识别特征。

- 单色本体（灰白、米色、灰色、棕黄色或棕色）。
- 端电极完全覆盖电容器的两端。
- 多种尺寸：

1）1206 型：长为 0.125in；宽为 0.063in（3.2mm×1.6mm），厚度与颜色可变。

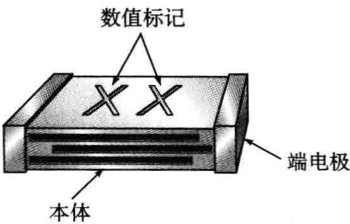


图 B-2 电容器标记

2）0805 型：长为 0.080in；宽为 0.050in（2.0mm×1.25mm），厚度与颜色可变。

3）单色（通常是半透明棕黄色或棕色）可变尺寸，尺寸长度从 0.059in（1.5mm）～0.220in（5.6mm），宽度从 0.032in（0.8mm）～0.197in（5.0mm）。

● 三种不同的标记系统：

1）两个位置（仅字母与数字）；

2）两个位置（字母与数字或两个数字）；

3）一个位置（可变颜色字母）。

B.3 标准两位置码

参见表 B-2。

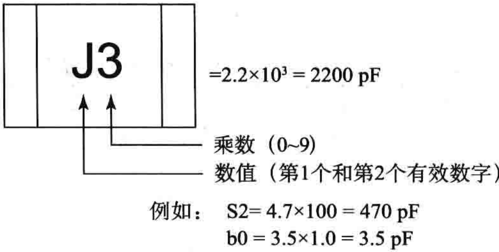


表 B-2 标准两位置码

数值①						乘数
A	1.0	L	2.7	T	5.1	0=×1.0
B	1.1	M	3.0	U	5.6	1=×10
C	1.2	N	3.3	m	6.0	2=×100
D	1.3	b	3.5	V	6.2	3=×1000
E	1.5	P	3.6	W	6.8	4=×10 000
F	1.6	Q	3.9	n	7.0	5=×100 000
G	1.8	d	4.0	X	7.5	等
H	2.0	R	4.3	t	8.0	
J	2.2	e	4.5	Y	8.2	
K	2.4	S	4.7	y	9.0	
a	2.5	f	5.0	Z	9.1	

① 注意大写和小写字母。

B.4 可替代的两位置码

参见表 B-3。



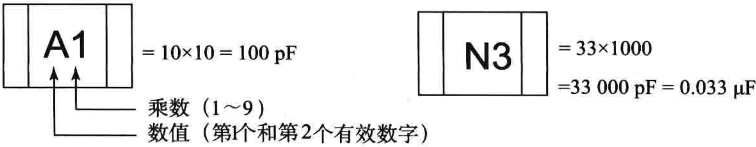


表 B-3 可替代的两位置码

数值[①]						乘数
A	10	J	22	S	47	1=×10
B	11	K	24	T	51	2=×100
C	12	L	27	U	56	3=×1000
D	13	M	30	V	62	4=×10 000
E	15	N	33	W	68	5=×100 000
F	16	P	36	X	75	等
G	18	Q	39	Y	82	
H	20	R	43	Z	91	

① 注意只有大写字母。

B.5 标准单位置码

参见表 B-4。

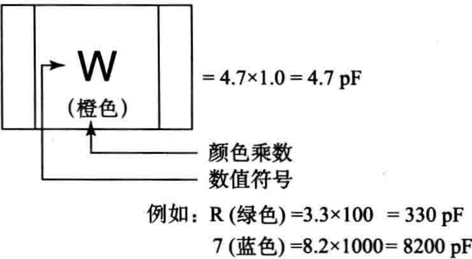


表 B-4 标准单位置码

数值						乘数（颜色）
A	1.0	K	2.2	W	4.7	橙色=×1.0
B	1.1	L	2.4	X	5.1	黑色=×10
C	1.2	N	2.7	Y	5.6	绿色=×100
D	1.3	O	3.0	Z	6.2	蓝色=×1000
E	1.5	R	3.3	3	6.8	紫色=×10 000
H	1.6	S	3.6	4	7.5	红色=×100 000
I	1.8	T	3.9	7	8.2	
J	2.0	V	4.3	9	9.1	

附录 C

诺顿定理与弥尔曼定理

C.1 诺顿定理

与戴维南定理类似，诺顿定理提供了一种将复杂电路简化为简单形式的方法，它们之间的根本区别是诺顿定理给出的是等效电流源并联等效电阻的形式。诺顿等效电路的形式如图 C-1 所示。不管原来的电路多么复杂，总是可以简化成这个等效形式。等效电流源记为 I_N，等效电阻记为 R_N。

应用诺顿定理，必须知道如何求得 I_N 和 R_N 这两个量，一旦知道给定电路的 I_N 和 R_N，只需将其并联连接即可获得完整的诺顿电路。

诺顿等效电流（I_N） I_N 是完整诺顿等效电路的一个部分，R_N 为另一部分。I_N 定义为电路中两点之间的短路电流，连接在这两个点之间的任何元件有效地“看到”数值为 I_N 的电流源与 R_N 并联。

为了便于说明，假设某种电阻电路的两个点之间接有一个电阻，如图 C-2a 所示，我们希望求得 R_L 所“看到”电路部分的诺顿等效电路。为求 I_N，计算 A 与 B 两点之间短路时的电流，如图 C-2b 所示。例 C-1 演示了如何求解 I_N。

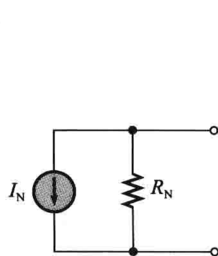


图 C-1 诺顿等效电路的形式

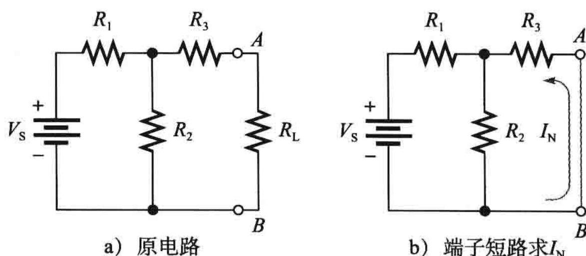


图 C-2 确定诺顿等效电流 I_N

【例 C-1】 求图 C-3a 中阴影部分电路的 I_N。

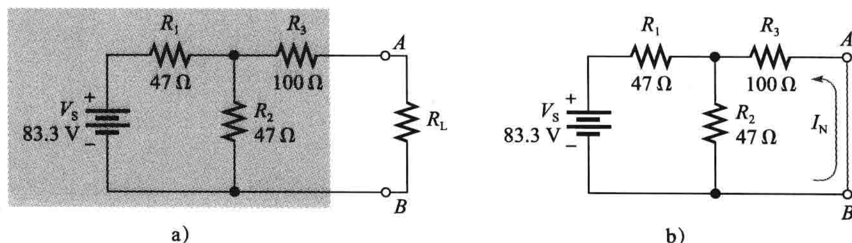


图 C-3 例 C-1 图

解： 将 A 与 B 两点短路，如图 C-3b 所示。I_N 是流过短路线的电流，计算过程如下：首先，电压源所见的总电阻为

$$R_T = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 47\Omega + \frac{47\Omega \times 100\Omega}{47\Omega + 100\Omega} = 79\Omega$$

电源流出的总电流为

$$I_T = \frac{V_S}{R_T} = \frac{83.3\text{V}}{79\Omega} = 1.05\text{A}$$

现在利用分流公式求 I_N（流过短路线的电流）。

$$I_N = \left(\frac{R_2}{R_2 + R_3}\right) I_T = \frac{47\Omega}{147\Omega} \times 1.05\text{A} = 336\text{mA}$$

这就是等效诺顿电流源的数值。

诺顿等效电阻（R_N）　R_N的定义与 R_{TH}相同：即在给定电路中所有电源都用内阻替换后，显现在两个端子之间的总电阻。例 C-2 演示了如何求解 R_N。

【例 C-2】　求图 C-3a 中阴影部分电路的 R_N（见例 C-1）。

解：首先将 V_S短路为零，如图 C-4 所示。

从 A 与 B 两端看入，R_1与 R_2的并联组合再和 R_3串联，因此，

$$R_N = R_3 + \frac{R_1}{2} = 100\Omega + \frac{47\Omega}{2} = 124\Omega$$

这两个例子说明了如何求解诺顿等效电路的两个等效元件 I_N和 R_N，在任意线性电路中这两个值都可以求得。一旦求得 I_N和 R_N，必须将它们并联起来构成诺顿等效电路。例 C-3 演示了这一过程。

【例 C-3】　画出图 C-3 原始电路（例 C-1）的完整诺顿电路。

解：在例 C-1 和例 C-2 中已经求得 I_N=336mA、R_N=124Ω。诺顿等效电路如图 C-5 所示。

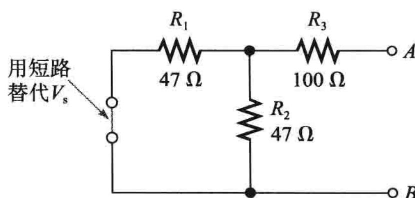


图 C-4　例 C-2 图

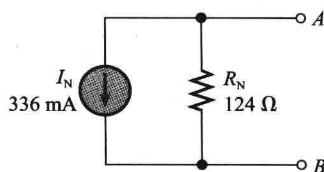


图 C-5　例 C-3 图

诺顿定理总结　任意连接在诺顿等效电路两端的负载电阻两端的电压和流过的电流与其接在原始电路两端时相同。理论上应用诺顿定理的步骤总结如下：

1）将需求解诺顿等效电路的两个端子短路。

2）求通过短路线的电流（I_N）。

3）求所有电压源短路和所有电流源开路（R_N=R_{TH}）两端之间的电阻（R_N）。

4）将 I_N和 R_N并联得到原始电路的完整诺顿等效。

也可以利用电源转换方法从戴维南等效导出诺顿等效。

C.2　弥尔曼定理

弥尔曼定理将任意个并联的电压源简化为单一电压源，从而简化了负载电流和电压的求解。对于若干电压源并联的特殊情况，弥尔曼定理给出了与戴维南定理相同的结果。弥尔曼定理的转化过程如图 C-6 所示。

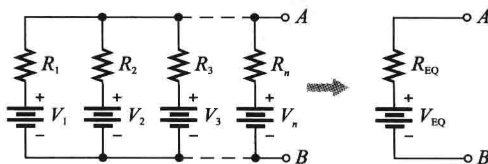


图 C-6　若干并联电压源简化为单个电压源

弥尔曼等效电压（V_{EQ}）和等效电阻（R_{EQ}） 弥尔曼定理给出了求解等效电压 V_{EQ}的公式。为了求解 V_{EQ}，将每个并联的电压源转换为电流源，如图 C-7 所示。

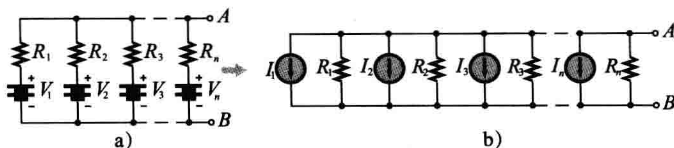


图 C-7 并联电压源转换为电流源

图 C-7b 中从并联电流源流出的总电流为

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n$$

A 与 B 两端之间的总电导为

$$G_T = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n$$

其中，$G_T = 1/R_T$、$G_1 = 1/R_1$，依次类推，注意电流源等效于开路。根据弥尔曼定理，等效电阻 R_{EQ}就是总电阻 R_T。

$$R_{EQ} = \frac{1}{G_T} = \frac{1}{(1/R_1)+(1/R_2)+(1/R_3)+\cdots+(1/R_n)} \tag{C-1}$$

根据弥尔曼定理，等效电压为 I_TR_{EQ}，其中 I_T可表示为

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_n = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \cdots + \frac{V_n}{R_n}$$

以下是计算等效电压的公式：

$$V_{EQ} = \frac{(V_1/R_1)+(V_2/R_2)+(V_3/R_3)+\cdots+(V_n/R_n)}{(1/R_1)+(1/R_2)+(1/R_3)+\cdots+(1/R_n)} \tag{C-2}$$

式（C-1）和式（C-2）是两个弥尔曼公式，等效电压源的极性使得流过负载的电流与原电路中电流的方向相同。

【例 C-4】 利用弥尔曼定理求图 C-8 中 R_L两端的电压和流过的电流。

解：应用弥尔曼定理如下。

$$R_{EQ} = \frac{1}{(1/R_1)+(1/R_2)+(1/R_3)} = \frac{1}{(1/22\Omega)+(1/22\Omega)+(1/10\Omega)} = \frac{1}{0.19\text{S}} = 5.24\Omega$$

$$V_{EQ} = \frac{(V_1/R_1)+(V_2/R_2)+(V_3/R_3)}{(1/R_1)+(1/R_2)+(1/R_3)} = \frac{(10\text{V}/22\Omega)+(5\text{V}/22\Omega)+(15\text{V}/10\Omega)}{(1/22\Omega)+(1/22\Omega)+(1/10\Omega)} = \frac{2.18\text{A}}{0.19\text{S}} = 11.5\text{V}$$

单个等效电压源如图 C-9 所示。

现在求负载电阻的 I_L和 V_L。

$$I_L = \frac{V_{EQ}}{R_{EQ}+R_L} = \frac{11.5\text{V}}{52.2\Omega} = 220\text{mA}$$

$$V_L = I_LR_L = 220\text{mA} \times 47\Omega = 10.3\text{V}$$

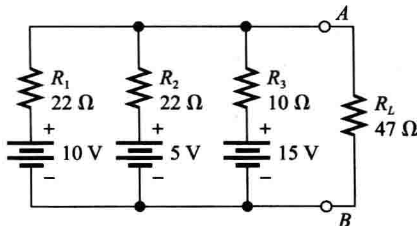


图 C-8 例 C-4 图

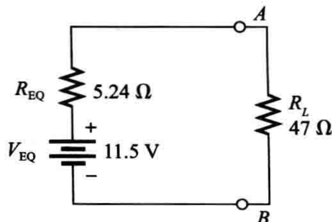


图 C-9 单个等效电压源

附录D

电路仿真工具 NI Multisim

D.1 仿真、原型和测试电路

D.1.1 理论、设计与原型

由于电子电路和系统变得越来越先进，电路设计人员依靠计算机进行设计，工程师和技术人员必须进行系统设计、仿真、原型和布局电路。学生也可以利用工程和设计过程，以加强课堂学习的概念和理论。图 D-1 显示了学生设计过程的三个阶段。

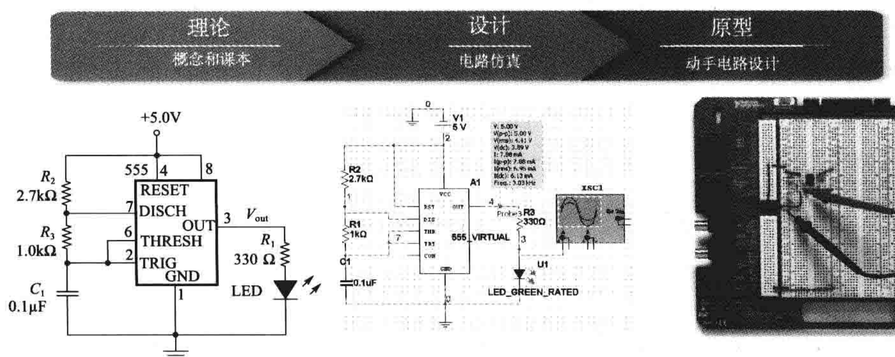


图 D-1 学生设计实际电路过程的三个阶段

国家仪器电子教育平台是专为学生和教育工作者设计的端对端工具链，该平台包括 NI Multisim 仿真软件、NI 教育实验室虚拟仪器包（NI ELVIS）原型工作站和 NI LabVIEW 图形化编程环境。NI Multisim 提供直观的原理图绘制、SPICE 仿真与 NI ELVIS 集成，可帮助学生探究电路理论和设计电路以观察电路的特性。NI ELVIS 是一个原型制作平台，允许学生快速便捷地生成他们的电路。利用 NI LabVIEW，学生可以测试真实信号并与仿真结果进行比较。

1）研究理论 通过《电子电路基础》课本和课程教学，学习电路设计的基础理论，下载本教材的 Multisim 仿真电路文件，在便于使用的 Multisim 仿真环境中巩固重要概念。Multisim 仿真电路文件可帮助深入理解电路的性能，通过使用预先设计的电路文件，仿真和分析每一章的例题和习题中电路的性能。

2）设计与仿真 电路仿真提供了对电路的交互操作，从无到有构造电路并利用内建电路仪器观察设计性能，在理想的预实验室环境中进行探测。利用 Multisim 仿真的 3D 面包板，实现电路框图到真实物理实现的转换。

3）原型、测试与比较 着手体验构造实物电路是必不可少的。从 3D 面包板转移到 NI ELVIS 真实面包板，无缝完成原型电路的整个设计过程。在 LabVIEW 环境中，对真实测量值与仿真值进行比较以加强理论、充分理解电路的性能、建立专业工程分析的基础。

D.1.2 NI Multisim

Multisim 仿真软件将强大的 SPICE 仿真和电原理图绘制集成起来，在计算机上构建成高度交互的电子实验室。利用 Multisim 仿真学生版加强学习：

- 在简单、易学的环境中构建电路；

- 仿真和分析家庭作业和预实验任务的电路；
- 实验课前在家里以 3D 面包板搭建电路；
- 用近 4000 个器件生成多达 50 个元件的设计；
- 和 NI ELVIS 原型制作工作站集成。

在后台应用工业标准 SPICE 的同时，利用 Multisim 仿真软件的拖放界面，使电路绘制、连线和分析简单且易于使用。可以在理想的实验环境中从头开始建立电路，使用内置的虚拟仪器和探头观察设计性能。利用 3D 面包板，可以很容易地实现从电路图到真实电路的飞跃。

利用 Multisim 学习电路基础 从本书生成一个例子来熟悉 Multisim 仿真环境，首先启动 Multisim 仿真软件，打开一个新的原理图窗口（**File→New→Schematic Capture**），将元件工具栏的元件放置到电路窗口来设计电路，单击元件工具栏，打开元件浏览器，选择元件系列并选择元件，双击将其放置在电路窗口。

一旦选择了一个元件，该元件就附着并“幽灵”在鼠标光标上，在原理图中所需的位置再次单击放置元件。如果初次使用 Multisim 仿真软件，应该使用 **BASIC _ VIRTUAL** 元件系列，可以指定任意参数值。例如，一个简单的 Multisim 仿真电路——*RLC* 电路，如图 D-2 所示。该电路接 1kΩ 电阻、47mH 电感和 10nF 电容，所有这些元件都能在元件数据库（Component Database）的基本组（Basic Group）中找到。

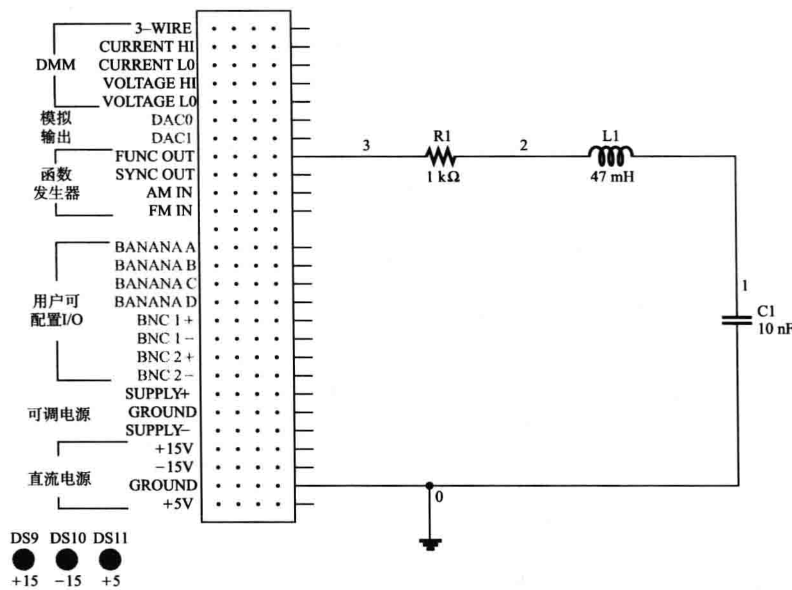


图 D-2 *RLC* 电路的 Multisim 仿真原理图

下一步是把元件线接在一起，只需在源连接端按一下鼠标左键然后在目标连接端再按一下鼠标左键，Multisim 即在两个端子之间自动选择最佳的虚拟导线路径。一定要先确保完全绘制了电路，然后就可以仿真电路，可以用仿真结果与物理电路进行比较。

要分析电路，可在仿真运行时使用测量探头测量电路中的电压和其他特性，使用虚拟示波器来分析示例 *RLC* 电路的输出信号。

D. 1. 3 NI ELVIS

NI ELVIS 是一个基于 LabVIEW 为大学科学和工程实验室提供的 LabVIEW 设计和原型制作环境。NI ELVIS 包括虚拟仪器或 LabVIEW 函数、多功能数据采集设备、定制设计的台式

工作站和原型开发板。这种组合提供了教学实验室所需的完整套件工具。NI ELVIS 工作站如图 D-3 所示。

NI ELVIS 是使用 Multisim 仿真的电子实验室的理想配套，通过 USB 连接，易于安装、维护且便携，带有真实电路原型制作的便携式面包板。

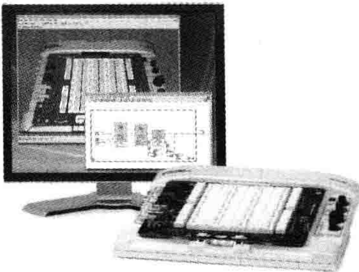


图 D-3 NI ELVIS 工作站

NI ELVIS 是一个特制的面包板原型制作环境，内置有函数发生器、数字万用表（DMM）、示波器和可调电源。面包板是可拆卸的，这样实验项目和实验室工作可以与 NI ELVIS 独立。NI ELVIS 提供基于 Lab VIEW 的与虚拟仪器交互的软件。

利用 NI ELVIS 学习电路基础 回到介绍使用 Multisim 仿真的 *RLC* 电路的例子，可以继续原型电路制作。利用原型硬件，可以在标准面包板上快速构建电路，并使用实验室仪器来测试完成设计。

也可以使用 Multisim 仿真中的虚拟 3D NI ELVIS 作原型仿真。构建 3D NI ELVIS 原型的方法是：单击 **Tools→Show Breadboard**，打开 3D 面包板，放置元件并连接建立电路，NI ELVIS原理图中相应的连接点和符号变为绿色表明 3D 连接正确。如果创建了一个传统的原理图，将会看到一个标准的面包板。图 D-4 显示了 Multisim 仿真中准备就绪的 3D 虚拟 NI ELVIS原型电路。一旦使用 3D 虚拟环境验证了电路布局，就可以在实际 NI ELVIS 上搭建电路。

构建电路后，即可使用 NI ELVIS 仪器测量电路的输出信号。图 D-5 显示了 Multisim 仿真示波器上 *RLC* 电路的仿真信号，图 D-6 为用 ELVIS II 示波器测得的信号。这个过程中最重要的步骤是将原型电路的测量值与仿真值相比较，这可以帮助确定设计中存在的潜在错误。比较测量值与理论值后，可以重新设计改进电路，或准备使用诸如 NI Ultiboard 这样的软件进行印制电路板的布局布线。

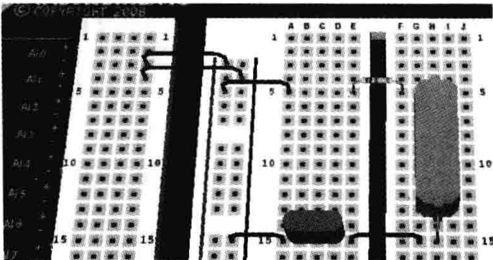


图 D-4 Multisim 仿真中的原型电路

NI Multisim 仿真电路文件 下载 Multisim 仿真电路文件加强对电路性能的深入理解。要下载预先建立的 Multisim 仿真电路文件和资源，可访问 ni. com/academic/floyd。

NI Multisim 资源 该链接提供下列参考资源帮助使用 NI Multisim：

- 下载 30 天免费的 Multisim 仿真软件评估版；
- 查看 Multisim 入门指南；
- 学习 Multisim 仿真辅导课程 3 个小时；
- 在线讨论区中交流 Multisim 仿真软件的使用。



图 D-5 Multisim 仿真信号

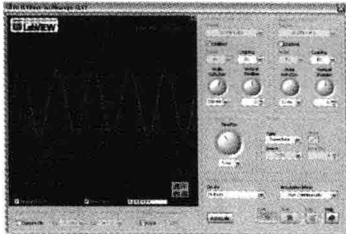


图 D-6 NI ELVIS 测量信号

附录E

奇数编号习题答案

第1章

1. 首先用计算机设计与仿真程序对电路进行测试，可以模拟电路的性能并查找潜在问题。仿真满意后，构建原型电路并测试，根据需要进行修改，然后再投入生产。
3. 电子组件变得更加复杂，但也更可靠，所以没有太大的必要进行维修。通常，更换电路板比排除组件故障还要便宜，技术人员需要比过去更广泛的技能。
5. 优点是数字信号容易处理和存储，受噪声干扰较小。
7. (a) 电子振荡器产生重复性电子信号。
   (b) 振荡器没有输入信号。
9. 载波是高频无线电波，可被低频信号调制（改变）。

11. (a) 3×10^3　(b) 7.5×10^4　(c) 2×10^6
13. (a) 8.4×10^3　(b) 9.9×10^4　(c) 2×10^5
15. (a) 0.000 002 5　(b) 500　(c) 0.39
17. (a) 4.32×10^7　(b) $5.000\ 85\times10^3$　(c) 6.06×10^{-8}
19. (a) 2.0×10^9　(b) 3.6×10^{14}　(c) 1.54×10^{-14}
21. (a) 89×10^3　(b) 450×10^3　(c) 12.04×10^{12}
23. (a) 345×10^{-6}　(b) 25×10^{-3}　(c) 1.29×10^{-9}
25. (a) 7.1×10^{-3}　(b) 101×10^6　(c) 1.50×10^6
27. (a) 22.7×10^{-3}　(b) 200×10^6　(c) 848×10^{-3}
29. (a) 345μA　(b) 25mA　(c) 1.29nA
31. (a) 3μF　(b) 3.3MΩ　(c) 350nA
33. (a) 5000μA　(b) 3.2mW　(c) 5MV　(d) 10 000kW
35. (a) 50.68mA　(b) 2.32MΩ　(c) 0.0233μF
37. (a) 3　(b) 2　(c) 5　(d) 2　(e) 3　(f) 2

第2章

1. 80×10^{12}C
3. 4.64×10^{-18}C
5. (a) 10V　(b) 2.5V　(c) 4V
7. 20V
9. 12.5V
11. (a) 75A　(b) 20A　(c) 2.5A
13. 2s
15. A：6800Ω ±10%
    B：33Ω ±10%
    C：47 000Ω ±5%
17. (a) 红色、紫色、棕色、金色
    (b) B：330Ω，D：2.2kΩ，A：39kΩ，L：56kΩ，F：100kΩ

19. (a) 10Ω ±5%
    (b) 5.1MΩ ±10%
    (c) 68Ω ±5%
21. (a) 28.7kΩ ±1%
    (b) 60.4Ω ±1%
    (c) 9.31kΩ ±1%
23. (a) 22Ω (b) 4.7kΩ (c) 82kΩ
    (d) 3.3kΩ (e) 56Ω (f) 10MΩ
25. 有电流流过灯泡2。
27. 电流表与电阻串联，负极端接电源的负端，正极端接 R_1 的一端。电压表跨接（并联）在电源两端（负极端接负极，正极端接正极）。
29. 位置1：$V_1 = 0$，$V_2 = V_S$
    位置2：$V_1 = V_S$，$V_2 = 0$
31. 250V
33. (a) 200Ω (b) 150MΩ (c) 4500Ω
35. 33.3V
37. AWG #27
39. 电路b)
41. 一个电流表与电池串联，每个电阻串联一个电流表（总共7个）。
43. 见图P-1

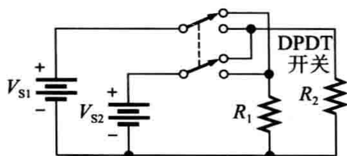


图 P-1

第3章

1. (a) 3A (b) 0.2A (c) 1.5A
3. 15mA
5. (a) 3.33mA (b) 550μA (c) 588μA
   (d) 500mA (e) 6.60mA
7. (a) 2.50mA (b) 2.27μA (c) 8.33mA
9. I =0.642 A，所以0.5A熔断器将熔断。
11. (a) 10mV (b) 1.65V (c) 14.1kV (d) 3.52V (e) 250mV
    (f) 750kV (g) 8.5kV (h) 3.53mV
13. (a) 81V (b) 500V (c) 117.5V
15. (a) 2kΩ (b) 3.5kΩ (c) 2kΩ
    (d) 100kΩ (e) 1MΩ
17. (a) 4Ω (b) 3kΩ (c) 200kΩ
19. 2.6W
21. 417mW
23. (a) 1MW (b) 3MW (c) 150MW (d) 8.7MW
25. (a) 2 000 000μW (b) 500μW (c) 250μW (d) 6.67μW
27. $P=W/t$ 用瓦特表示；$V=W/Q$；$I=Q/t$。$P=VI=W/t$，所以 1V×1A=1W。
29. 16.5mW
31. 1.18kW
33. 5.81W

35. 25Ω
37. 0.001 86kWh
39. 156mW
41. 1W
43. (a) 顶端为正　　(b) 底端为正　　(c) 右边为正
45. 36Ah
47. 13.5mA
49. 4.25W
51. 5次
53. 150Ω
55. $V=0V$，$I=0A$；$V=10V$，$I=100mA$；
$V=20V$，$I=200mA$；$V=30V$，$1=300mA$；
$V=40V$，$I=400mA$；$V=50V$，$I=500mA$；
$V=60V$，$I=600mA$；$V=70V$；$I=700mA$；
$V=80V$，$I=800mA$；$V=90V$，$I=900mA$；
$V=100V$，$I=1A$
57. $R_1=0.5\Omega$，$R_2=1\Omega$；$R_3=2\Omega$
59. 10V；30V
61. 216kWh
63. 12W
65. 2.5A
67. 功率将增大4倍。
69. 见图P-2。
71. 没有错误。
73. 灯泡4短路。

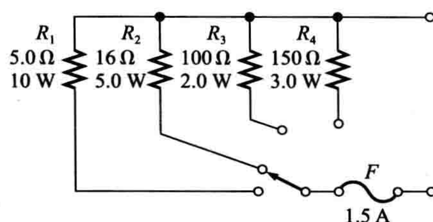


图 P-2

第4章

1. 见图P-3。

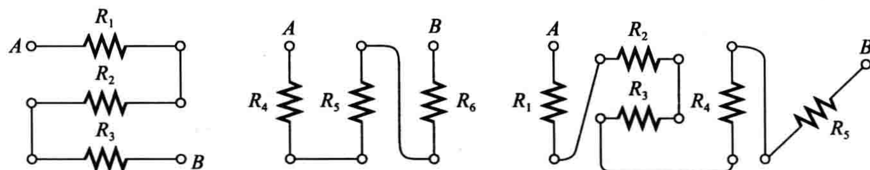


图 P-3

3. 170kΩ
5. 138Ω
7. (a) 7.9 kΩ　　(b) 33Ω　　(c) 13.24MΩ
将串联电路从电源断开，然后将欧姆表跨接在电路两端。
9. 1126Ω
11. (a) 170kΩ　　(b) 50Ω　　(c) 12.4kΩ　　(d) 1.97kΩ
13. 0.1A
15. (a) 625μA　　(b) 4.26μA，电流表串联连接。

17. (a) 34.0mA (b) 16V (c) 0.543W
19. 见图 P-4。



图 P-4

21. 26V
23. (a) $V_2=6.8V$
(b) $V_R=8V$, $V_{2R}=16V$, $V_{3R}=24V$, $V_{4R}=32V$。
电压表跨接（并联）在未知电压的电阻两端。
25. (a) 3.84V (b) 6.77V
27. 3.80V; 9.38V
29. $V_{5.6k\Omega}=10V$; $V_{1k\Omega}=1.79V$; $V_{560\Omega}=1V$; $V_{10k\Omega}=17.9V$
31. 55mV
33. 分别对地测量 V_A 和 V_B，然后计算 $V_{R2}=V_A-V_B$。
35. 4.27V
37. (a) R_4 开路 (b) R_4 和 R_5 短路
39. 780Ω
41. $V_A=10V$; $V_B=7.72V$; $V_C=6.68V$; $V_D=1.81V$; $V_E=0.57V$; $V_F=0V$
43. 500Ω
45. (a) 19.1mA (b) 45.8V
(c) $R\left(\frac{1}{8}W\right)=343\Omega$, $R\left(\frac{1}{4}W\right)=686\Omega$, $R\left(\frac{1}{2}W\right)=1371\Omega$
47. 见图 P-5。
49. $R_1+R_7+R_8+R_{10}=4.23k\Omega$;
$R_2+R_4+R_6+R_{11}=23.6k\Omega$;
$R_3+R_5+R_9+R_{12}=19.9k\Omega$
51. A: 5.45mA; B: 6.06mA; C: 7.95mA; D: 12mA
53. A: $V_1=6.03V$, $V_2=3.35V$, $V_3=2.75V$, $V_4=1.88V$, $V_5=4.0V$;
B: $V_1=6.71V$, $V_2=3.73V$, $V_3=3.06V$, $V_5=4.5V$;
C: $V_1=8.1V$, $V_2=4.5V$, $V_5=5.4V$;
D: $V_1=10.8V$, $V_5=7.2V$

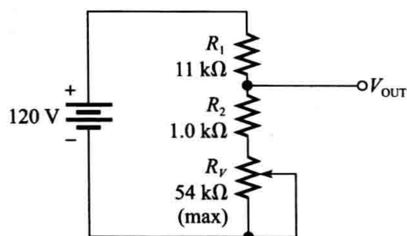


图 P-5

55. 是有问题，R_3 和 R_5 短路。
57. (a) 由于功率过大，R_{11} 烧断。
(b) 更换 R_{11} (10kΩ)
(c) 338V
59. $I=375mA$
61. $I_T=5.0A$
63. R_6 短路。
65. 灯泡 4 开路。
67. 82Ω 电阻短路。

第 5 章

1. 见图 P-6。

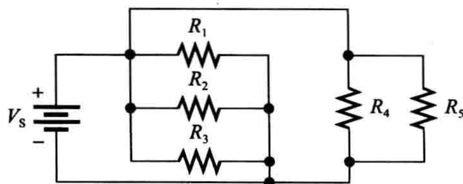


图 P-6

3. 3.43kΩ
5. (a) 25.6Ω (b) 359Ω

(c) 819Ω (d) 996Ω

7. 2kΩ

9. 12V；5mA。

11. (a) 909μA (b) 76mA

13. (a) I_1=179μA；I_2=455μA

(b) I_1=444μA；I_2=80μA

15. 1350mA

17. I_2= I_3=7.5mA，每条支路中电流表与电阻串联连接。

19. 6.4A；6.4A

21. I_1=2.19A；I_2=811mA

23. 200mW

25. 0.625A；3.75A

27. 1.0kΩ 电阻开路。

29. R_2开路。

31. R_2=25Ω；R_3=100Ω；R_4=12.5Ω

33. I_R=4.8A；I_{2R}=2.4A；I_{3R}=1.6A；I_{4R}=1.2A

35. (a) R_1=100Ω，R_2=200Ω，I_2=50mA

(b) I_1=125mA，I_2=74.9mA，R_1=80Ω，R_2=134Ω，V_S=10V

(c) I_1=253mA，I_2=147mA，I_3=100mA，R_1=395Ω

37. 53.7Ω

39. 能，总电流=14.7A

41. $R_1 \| R_2 \| R_5 \| R_9 \| R_{10} \| R_{12}$ = 100kΩ || 220kΩ || 560kΩ || 390kΩ || 1.2MΩ || 100kΩ = 33.6kΩ

$R_4 \| R_6 \| R_7 \| R_8$ = 270kΩ || 1.0MΩ || 820kΩ || 680kΩ =135.2kΩ

$R_3 \| R_{11}$ = 330kΩ || 1.8MΩ = 278.9kΩ

43. R_2=750Ω；R_4=423Ω

45. 4.7kΩ 电阻开路。

47. (a) 75.0Ω (b) 26.6W

49. 8.9Ω

51. R_3开路。

53. (a) 引脚 1 到引脚 4 的 R 与计算值一致。

(b) 引脚 2 到引脚 3 的 R 与计算值一致。

第 6 章

1. R_2、R_3和R_4并联，这个并联组合与R_1和R_5串联。

3. 见图 P-7。

5. 2003Ω

7. (a) 128Ω (b) 791Ω

9. (a) I_1 = I_4=11.7mA，I_2 = I_3=5.85mA；V_1=655mV，V_2= V_3=585mV，V_4=257mV

(b) I_1=3.8mA，I_2=618μA，I_3=1.27mA，I_4=1.91mA；V_1=2.58V，V_2=V_3=V_4=420mV

11. 2.22mA

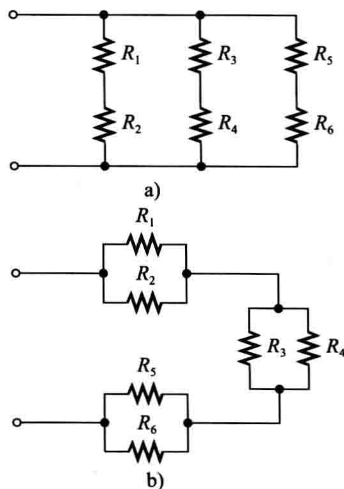


图 P-7

13. 空载7.5V，有载7.29V。
15. 56kΩ负载
17. 22kΩ
19. 2V
21. 33%
23. 360Ω
25. 7.33kΩ
27. $R_{TH}=18k\Omega$；$V_{TH}=2.7V$
29. 1.06V；226μA
31. 75Ω
33. 21mA
35. 不正确，电表读数应该为4.39V。680Ω电阻开路。
37. 7.62V和5.24V读数正确，表明3.3kΩ电阻开路。
39. (a) $V_1=-10V$，其他为0V。
    (b) $V_1=-2.33V$，$V_4=-7.67V$，$V_2=-7.67V$，$V_3=0V$
    (c) $V_1=-2.33V$，$V_4=-7.67V$，$V_2=0V$，$V_3=-7.67V$
    (d) $V_1=-10V$，其他为0V。
41. 见图P-8。
43. $R_T=5.76k\Omega$；$V_A=3.3V$；$V_B=1.7V$；$V_C=850mV$
45. $V_1=1.61V$；$V_2=6.77V$；$V_3=1.72V$；$V_4=3.33V$；$V_5=378mV$；$V_6=2.57V$；$V_7=378mV$；$V_8=1.72V$；$V_9=1.61V$。
47. 110kΩ
49. $R_1=180\Omega$；$R_2=60\Omega$。R_2两端输出。

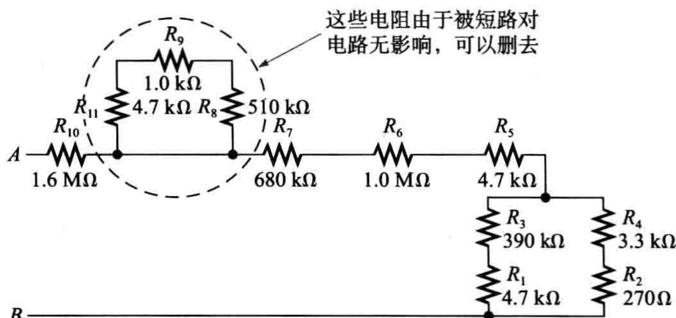


图 P-8

51. 845μA
53. 位置1：$V_1=88.0V$，$V_2=58.7V$，$V_3=29.3V$
    位置2：$V_1=89.1V$，$V_2=58.2V$，$V_3=29.1V$
    位置3：$V_1=89.8V$，$V_2=59.6V$，$V_3=29.3V$
55. $V_G=0V$
57. 2.2kΩ电阻开路。
59. $V_B=12.0V$
61. $V_{4mA}=0.60V$；$V_{20mA}=3.0V$
63. 因为三点确定一个面，三个压力传感器可以均匀载荷。
65. R_2短路。
67. 无故障。
69. R_4短路。
71. R_5短路。

第7章

1. 减小。
3. 37.5μWb

5. 1000G
7. 597
9. 1500A
11. (a) 电磁力 (b) 弹力
13. 电磁力
15. 改变电流
17. 材料 A
19. 1mA
21. 3.02m/s
23. 56.3W
25. (a) 168W (b) 14W
27. 80.6%
29. 输出电压峰值为 10V 直流，带有 120Hz 纹波。
31. 为使极性反转，活动触点将处于下方位置，所以线圈得电。
33. 设计有缺陷，12V 电压不足以使得两个串联的 12V 继电器工作；24V 电压给 12V 灯供电太高。应安装一个单独的 12V 电源给灯供电，而将继电器的电源由 12V 改为 24V。

第 8 章

1. (a) 1Hz (b) 5Hz (c) 20Hz
   (d) 1kHz (e) 2kHz (f) 100kHz
3. 2μs
5. 10ms
7. (a) 7.07mA (b) 4.5mA (c) 14.14mA
9. (a) 17.7V (b) 25V (c) 0V (d) −17.7V
11. 15°，A 超前。
13. 见图 P-9。
15. (a) 22.5° (b) 60° (c) 90°
    (d) 108° (e) 216° (f) 324°
17. (a) 57.4mA (b) 99.6mA (c) −17.4mA
    (d) −57.4mA (e) −99.6mA (f) 0mA
19. 30°：13.0V；45°：14.5V；90°：13.0V；180°：−7.5V；200°：−11.5V；300°：−7.5V

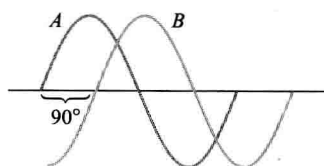


图 P-9

21. (a) 7.07mA (b) 0A (c) 10mA
    (d) 20mA (e) 10mA
23. 7.38V
25. 4.24V
27. 250Hz
29. 200r/s
31. 单相电动机需要启动绕组或其他产生启动电动机转矩的方法，而三相电动机能够自启动。
33. $t_r \approx 3.0$ms；$t_f \approx 3.0$ms；$t_W \approx 12.0$ms；振幅=5V。
35. (a) −0.375V (b) 3.01V
37. (a) 50Hz (b) 10Hz
39. 25kHz

41. 0.424V；2Hz
43. 1.4V；120ms；30%
45. 调制信号是一个低频波，用来改变高频波。调制信号可以从外部信号源加入，也可以由内部产生。
47. 脉串模式输出特定数量个周期的波形，而门控模式则输出由门信号设置的一段时间的波形。
49. I_{max}= 2.38A；V_{avg}= 136V；见图 P-10。
51. (a) 2.5 (b) 3.96V (c) 12.5kHz
53. 见图 P-11。

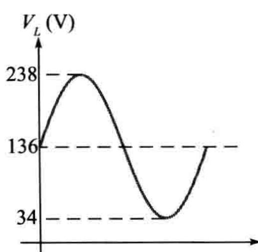
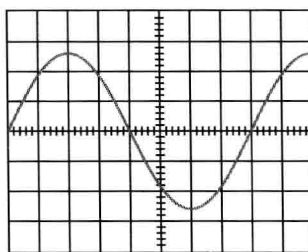


图 P-10


图 P-11

55. $V_{p(in)}$ = 4.44V；f_{in}=2Hz
57. R_3开路。
59. 5V；1ms。

第9章

1. (a) 5μF (b) 1μC (c) 10V
3. (a) 0.001μF (b) 0.0035μF (c) 0.000 25μF
5. 2μF
7. 88.5pF
9. 0.0249μF
11. 增大 12.5pF
13. 陶瓷电容
15. (a) 0.022μF (b) 0.047μF (c) 0.001μF (d) 22pF
17. (a) 封装 (b) 电介质（陶瓷盘） (c) 极板（金属盘） (d) 引线
19. (a) 0.69μF (b) 69.7pF (c) 2.6μF
21. V_1= 2.13V；V_2= 10V；V_3= 4.55V；V_4= 1V
23. 5.5μF；27.5μC。
25. (a) 100μs (b) 560μs (c) 22.1μs (d) 15ms
27. (a) 9.48V (b) 13.0V (c) 14.3V (d) 14.7V (e) 14.9V
29. (a) 2.72V (b) 5.90V (c) 11.7V
31. (a) 339kΩ (b) 13.5kΩ (c) 677Ω (d) 33.9Ω
33. X_{C1}= 1.42kΩ；X_{C2}= 970Ω；X_{CT}= 2.39kΩ；V_1= 5.94 V；V_2= 4.06V
35. 200Ω
37. P_{true}=0W；P_r= 3.39mVAR
39. 0Ω
41. 3.18ms
43. 3.24μs

45. (a) 10ms 充电到 3.32V，然后经 215ms 放电到 0V。

(b) 10ms 充电到 3.32V，然后放电 5ms 到 2.96V，接着向 20V 充电。

47. $C_1=1.25\text{nF}$

49. 16Hz

51. C_2开路。

53. 无故障。

第 10 章

1. 8kHz；8kHz

3. (a) 288Ω (b) 1209 Ω

5. (a) 726 kΩ (b) 155 kΩ (c) 91.5kΩ (d) 63.0 kΩ

7. (a) 34.7mA (b) 4.14mA

9. $I_{tot}=12.3\text{mA}$；$V_{C_1}=1.31\text{V}$；$V_{C_2}=0.595\text{V}$；$V_R=0.616\text{V}$；$\theta=72.0°$（V_S滞后于 I_{tot}）

11. 808Ω；−36.1°

13. (a) 90° (b) 86.4° (c) 57.8° (d) 9.04°

15. 326Ω；64.3°

17. 245Ω；80.5°

19. $I_{C_1}=118\text{ mA}$；$I_{C_2}=55.3\text{ mA}$；$I_{R_1}=36.4\text{ mA}$；
$I_{R_2}=44.4\text{mA}$；$I_{tot}=191\text{mA}$；$\theta=65.0°$（V_S滞后于 I_{tot}）

21. (a) 3.86kΩ (b) 21.3μA (c) 14.8μA
(d) 25.9μA (e) 34.8°（V_S滞后于 I_{tot}）

23. $V_{C_1}=8.74\text{V}$；$V_{C_2}=3.26\text{V}$；$V_{C_3}=3.26\text{V}$；$V_{R_1}=2.11\text{V}$；$V_{R_2}=1.15\text{V}$

25. $I_{tot}=82.4\text{mA}$；$I_{C_2}=14.4\text{mA}$；$I_{C_3}=67.6\text{mA}$；$I_{R_1}=I_{R_2}=6.39\text{mA}$

27. 4.03VA

29. 0.915

31. 利用公式 $V_{out}=\left(\dfrac{X_C}{Z_{tot}}\right)1\text{V}$，见表 P-1 和图 P-12。

表 P-1

频率/kHz	X_C/kΩ	Z_{tot}/kΩ	V_{out}/V	频率/kHz	X_C/kΩ	Z_{tot}/kΩ	V_{out}/V
0			1.000	6	0.680	3.96	0.172
1	4.08	5.64	0.723	7	0.583	3.94	0.148
2	2.04	4.40	0.464	8	0.510	3.93	0.130
3	1.36	4.13	0.329	9	0.453	3.93	0.115
4	1.02	4.03	0.253	10	0.408	3.92	0.104
5	0.816	3.98	0.205				

33. 见图 P-13。

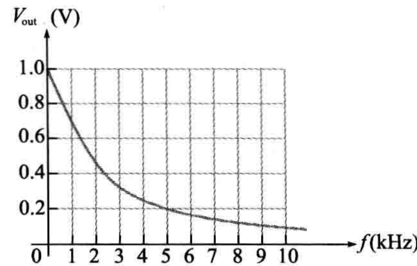
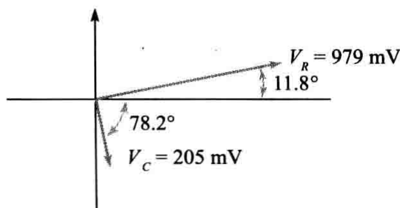
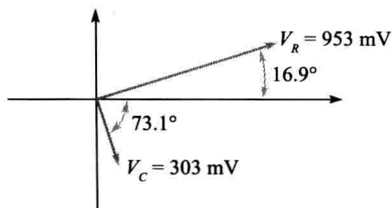


图 P-12



a）对应图10-67



b）对应图10-68

图 P-13

35. 图 10-67：1.05kHz；图 10-68：1.59kHz
37. 无漏电：V_{out}=3.21V；Q=18.7°；有漏电：V_{out}=2.83V；θ=33.3°
39. (a) 0V　(b) 0.321V　(c) 0.5V　(d) 0V
41. (a) $I_{L(A)}$=4.8A；$I_{L(B)}$=3.33A
  (b) $P_{r(A)}$=606VAR；$P_{r(B)}$=250VAR
  (c) $P_{true(A)}$=979W；$P_{ture(B)}$=758W
  (d) $P_{a(A)}$=1151VA；$P_{a(B)}$=798VA
43. 11.4kΩ
45. P_r=1.32kVAR；P_a=2kVA
47. 0.103μF
49. C漏电。
51. 无故障。
53. R_2开路。
55. C_1短路的相移=13.7°

第 11 章

1. (a) 1000mH　(b) 0.25mH　(c) 0.01mH　(d) 0.5mH
3. 3450 匝
5. 50mJ
7. 155μH
9. 7.14μH
11. (a) 50mH　(b) 57μH
13. (a) 1μs　(b) 2.13μs　(c) 200μs
15. (a) 5.52V　(b) 2.03V　(c) 0.747V　(d) 0.275V
  (e) 0.101V
17. (a) 157kΩ　(b) 179Ω
19. I_{tot}=10.1mA；I_{L2}=6.7mA；I_{L3}=3.37mA
21. 101mVAR
23. (a) −3.35V　(b) −1.12V　(c) −0.37V
25. (a) 0.427mA　(b) 0.569mA
27. X_{L1}=69Ω；X_{L2}=1037Ω；X_{LT}=1106Ω
29. L_3开路。
31. 无故障。
33. L_3短路。

第12章

1. 15kHz
3. (a) 1.12kΩ (b) 1.8kΩ
5. (a) 17.4Ω (b) 64Ω (c) 127Ω (d) 251Ω
7. 100kHz
9. (a) 8.94mA (b) 2.77mA
11. 38.7°
13. 见图P-14。
15. 7.69Ω
17. 537μS
19. 2.39kHz
21. (a) 274Ω (b) 89.3mA (c) 159mA
    (d) 183mA (e) 60.7°（I_{tot}滞后于V_S）
23. $V_{R_1}=7.92V$；$V_{R_2}=V_L=20.8V$
25. $I_{tot}=36mA$；$I_L=33.2mA$；$I_{R_2}=13.9mA$
27. 13.0mW；10.4mVAR
29. $PF=0.386$；$P_{true}=347mW$；$P_r=692mVAR$；
    $P_a=900mVAR$
31. 见图P-15。
33. $V_{R_1}=V_{L_1}=18V$；$V_{R_2}=V_{R_3}=V_{L_2}=0V$
35. 5.57V
37. 343mA
39. (a) 405mA (b) 228mA
    (c) 333mA (d) 335mA
41. L_2开路。
43. R_2开路。
45. L_1短路。

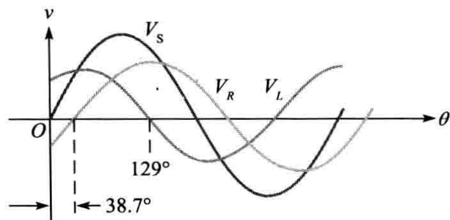


图 P-14

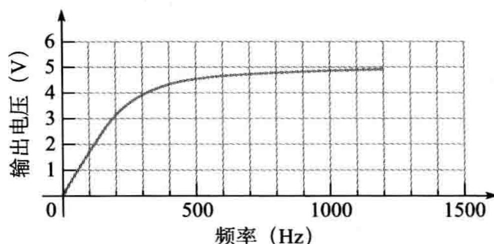


图 P-15

第13章

1. 520Ω，88.9°（V_S滞后于I）；520Ω，电容性。
3. 阻抗增大。
5. 见图P-16。
7. f_r较低。
9. $X_L=4.61k\Omega$；$X_C=4.61k\Omega$；$Z=220\Omega$；$I=54.5$ mA
11. $f_r=454$ kHz；$f_1=416$ kHz；$f_2=492$ kHz
13. (a) 14.5kHz；带通
    (b) 24.0 kHz；带通
15. (a) $f_r=339kHz$，$BW=239kHz$
    (b) $f_r=10.4kHz$，$BW=2.61kHz$
17. 电容性，$X_C<X_L$
19. 1.47kΩ
21. 53.1MΩ；104kHz
23. 62.5Hz

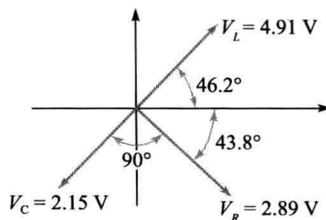


图 P-16

25. 1.38W
27. 200Hz
29. 见图 P-17。
31. $I_{R_1}=I_C=2.11\text{mA}$；$I_{L_1}=1.33\text{mA}$；$I_{L_2}=667\mu\text{A}$；$I_{R_2}=667\mu\text{A}$；$V_{R_1}=6.96\text{V}$；$V_C=2.11\text{ V}$；$V_{L_1}=V_{L_2}=V_{R_2}=6.67\text{V}$
33. $I_{R_1}=I_{L_1}=41.5\text{mA}$；$I_C=I_{L_2}=133\text{mA}$；$I_{tot}=104\text{mA}$
35. $L=989\mu\text{H}$；$C=0.064\mu\text{F}$
37. 忽略 R_W，8MHz：C=40pF；9MHz：C=31pF；10MHz：C=25pF；11MHz：C=21pF
39. 无故障。
41. L 短路。
43. L 短路。

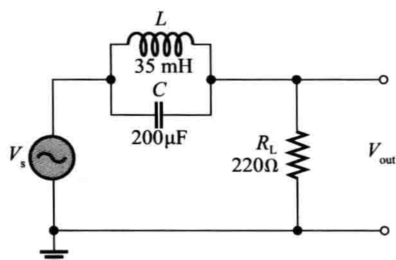


图 P-17

第 14 章

1. 1.5μH
3. 3
5. (a) 同相位 (b) 反相 (c) 反相
7. 500 匝。
9. (a) 同极性，有效值为 100V　　(b) 反极性，有效值为 100V
11. 240V
13. (a) 6V　　(b) 0V　　(c) 40V
15. (a) 10V　　(b) 240V
17. 33.3mA
19. 27.2Ω
21. 6.0mA
23. 0.5
25. 5kΩ
27. 94.5W
29. 0.98
31. 25kVA
33. 第 1 个二次绕组：2；第 2 个二次绕组：0.5；第 3 个二次绕组：0.25
35. 最顶端二次绕组：$n=100/1000=0.1$
次顶端二次绕组：$n=200/1000=0.2$
再次顶端二次绕组：$n=500/1000=0.5$
底端二次绕组：$n=1000/1000=1$
37. 原边吸取电流过大，除非原边设置熔断器保护，否则可能烧坏电源或变压器。
39. (a) $V_{L_1}=35\text{V}$，$I_{L_1}=2.92\text{A}$，$V_{L_2}=15\text{V}$，$I_{L_2}=1.5\text{A}$　　(b) 28.9Ω
41. (a) 20V　　(b) 10V
43. 0.0141 (70.7 : 1)
45. 0.1A
47. 二次绕组开路。
49. 一次绕组开路。

第15章

1. 103μs
3. 27kΩ
5. 12.6V
7. 见图P-18。
9. 见图P-19。

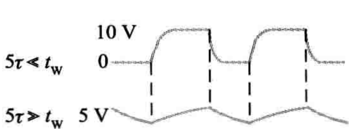


图 P-18

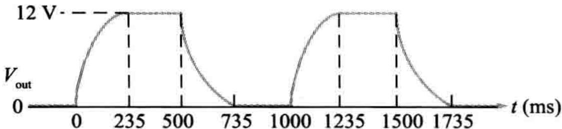


图 P-19

11. 15V直流电平，只有非常少量的充电和放电波动。
13. 交换R和C的位置，输出电压见图P-20。5τ =5ms（重复习题8）。
15. 输出与输入形状相似，只是平均值为0V。
17. 见图P-21。

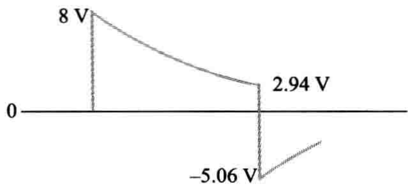


图 P-20

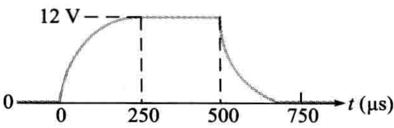


图 P-21

19. 见图P-22。
21. 6V直流电平。
23. （a）无故障 （b）C开路或R短路
25. （a）23.5ms （b）见图P-23。

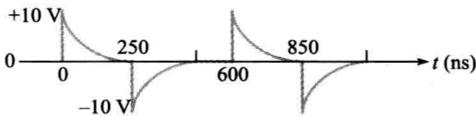


图 P-22

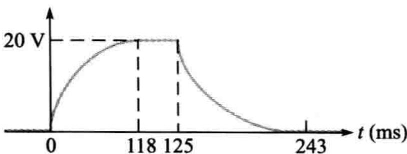


图 P-23

27. 1.44s
29. 一种方法如下：将放大器输入用设为三角波最低电压的直流电源替代，VCO将输出恒定频率信号，可用单独的仪器测量，这时示波器横轴不移动，记下其位置，增大直流电压，观察相应频率和示波器上的水平位置（屏幕上一个新的位置）。可以选择坐标轴上的几个点来校准作为水平位置函数的频率。
31. 电容开路。
33. 无故障。

附录 F

词汇表

A

准确度（accuracy） 测量误差范围的度量。

有源元件（active component） 需要施加电源才能正常工作的一种元件，有源元件可以提供比输入信号更大功率的信号输出。

导纳（admittance）（*Y*） 有抗电路允许电流通过能力的度量，为阻抗的倒数，单位是西门子（S）。

额定安时（ah rating） 由电池向负载提供的电流（A）与持续时间（h）相乘确定的电池额定容量。

交流发电机（alternator） 交流电发生器，交流发电机将机械能转换为电能。

电流表（ammeter） 一种用于测量电流的仪器。

安培（A 或 amp）（ampere） 电流的单位。

安（A）（ampere） 磁动势（mmf）的 SI 单位。

振幅（amplitude） 电压或电流的最大值。

模拟信号（analog signal） 连续的信号。

阳极（anode） 有极性设备电子流出的一端，对于提供电流的电池，这是负端。

视在功率（apparent power，P_a） 电压与电流的乘积，表示为伏安（VA）。在纯电阻电路中，与有功功率相同。

视在功率额定值（apparent power rating） 对变压器额定的方法，将功率容量表示成伏安（VA）值。

电枢（armature） 交流发电机、直流发电机或电动机中产生功率的线圈。直流发电机的电枢是转子，而在交流发电机中则可以是转子或定子，在电动机中电枢是转子。

原子（atom） 原子是保留元素特征的最小粒子。

原子序数（atomic number） 原子的原子核中质子的数量。

自耦变压器（autotransformer） 一次绕组和二次绕组共用一个绕组的变压器。

平均值（average value） （1）正弦波半个周期的平均值为 0.637 乘以峰值。（2）脉冲波的平均值等于基准值加上幅度乘以占空比。

美国线规（American wire gauge，AWG） 基于导线直径的标准。

B

反电动势（back emf（electromotive force）） 旋转电枢两端产生的阻碍原施加电压的电压。

平衡电桥（balanced bridge） 平衡状态下的电桥电路，电桥两端的电压为零。

平衡不平衡转换器（balun） 一种用来将平衡线路（如双绞线）转换为不平衡线路（如同轴电缆）或反之的变压器。

带通滤波器（band-pass filter） 一种谐振电路，允许落在两个截止频率之间的频率范围通过，而抑制低于或高出该频率范围的频率。

带阻滤波器（band-stop filter） 一种谐振电路，抑制落在两个截止频率之间的频率范围，而允许低于或高出该频率范围的频率通过。

带宽（bandwidth，*BW*） 某些电子电路的特性，指定了信号从输入端幅度无明显衰减地传递到输出端的有用频率范围。

基准（baseline） 脉冲波形的正常电平，没有脉冲时的电平值。

电池（battery） 利用化学反应将化学能转换为电能的一种能源。

偏置（bias） 使二极管或其他电子器件产生期望工作模式所需施加的直流电压值。

泄漏电流（bleeder current） 流入电路的总电流减去总负载电流后剩下的电流。

方框图（block diagram） 以图形表示系统结构的模型，用标记块来表示功能，用线条表示信号流。

边界（boundary） 系统和环境之间的分界线。

支路（branch） 并联电路中的一条电流路径。

旁路（bypass） 从一点到地之间连接的电容器，在不影响直流电压的前提下去除交流信号，是去耦的特例。

C

电容（capacitance） 电容器存储电荷的能力。

容抗（capacitive reactance） 电容器对正弦电流的抵抗力，单位为欧姆。

电容电纳（capacitive susceptance，B_C） 电容允许电流通过的能力度量，是电容电抗的倒数，单位是西门子（S）。

电容器（capacitor） 一种具有存储电荷能力的电气元件，由一或多个被称为电介质的绝缘材料隔离的导体构成。

载波（carrier） 可被低频信号调制（改变）的高频无线电波。

阴极（cathode） 有极性设备电子流入的一端，对于提供电流的电池，这是正端。

中心抽头（center tap，CT） 变压器副边绕组的中心连接点。

电荷（charge） 物质因为电子的过剩或不足而呈现的电特性，电荷可以是正的或负的。

充电（charging） 用电流从电容器一个极板把电荷移到另一块极板使一个极板比另一极板更加正的过程。

扼流圈（choke） 常常特指用于阻止或阻断高频的电感。

电路（circuit） 由设计用来产生期望的结果的电气元件互连构成，基本电路包括电源、负载和互连的电流通路。

断路器（circuit breaker） 电子电路中用于切断电路中过大电流的可复位保护器件。

圆密耳（circular mil，CM） 导线截面积的单位。

闭合电路（closed circuit） 具有完整电流路径的电路。

耦合系数（coefficient of coupling，k） 与变压器相关的常数，表示二次磁通与一次磁通的比值。理想值1表示一次绕组磁通全部被耦合到二次绕组。

线圈（coil） 电感的常用术语之一。

色码（color code） 一种色带或色点系统，用来识别电阻器或其他元件的值。

公共端（common） 电路的参考点，也称为参考接地。

电导（conductance，G） 一个电路允许电流流过的能力，是电阻的倒数，单位是西门子（S）。

导体（conductor） 容易建立电流的材料，例如铜。

磁心（core） 绕制电感器绕组的结构，磁心材料将影响电感器的电磁特性。

库仑（coulomb，C） 电荷的单位，6.25×10^{18}个电子所带电量的总和。

库仑定律（Coulomb's law） 描述两个带电体之间作用力的定律，指出两个带电体之间的作用力与两电荷带电量的乘积成正比而与它们之间距离的平方成反比。

耦合（coupling） 电路中两点之间接电容器允许交流通过而阻止直流通过的方法。

共价键（covalent） 两个或两个以上原子的价电子相互作用的键合结构。

晶体（crystal） 形成固体材料的原子模式或排列。

分流器（current divider） 一个并联电路，电流按与并联支路的电阻值成反比进行分配。

电流（current） 电荷（自由电子）流动的速率。

电流源（current source） 为任意负载都能提供恒定电流的器件。

周期（cycle） 周期性波形的一次重复。

D

直流分量（dc component） 脉冲波的平均值。

直流电源（dc power supply） 一种从交流电源或电池产生电压、电流和功率的电子仪器，适合用于电子设备供电。

十倍值（decade） 物理量的值按十倍改变，当物理量减少为原来的1/11或增大十倍时，称改变了十倍值。

分贝（decibel，dB） 一种对数单位，表示10乘以两个功率之比的对数或20乘以等值电阻两端电压之比的对数。

去耦（decoupling） 从电路中一点（通常在直流电源线上）到地之间接电容将交流短路到地而不影响直流的方法。

度（degree） 角度的度量单位，对应于旋转一周的1/360。

电介质（dielectric） 电容器极板之间的绝缘材料。

介电常数（dielectric constant） 电介质材料建立电场能力的度量。

介电强度（dielectric strength） 电介质材料不被击穿所能承受电压能力的度量。

数字信号（digital signal） 数值已离散化的信号。

数字万用表（DMM） 一种将测量电压、电流和电阻的仪表组合起来的电子仪器。

假负载（dummy load） 一个精确的大功率电阻。

占空比（duty cycle） 脉冲波形的重要特征，指脉冲存在期占整个周期的百分比，或脉冲宽度与周期的比值。

E

有效值（effective value） 正弦波热效应的度量，又称为rms值（方均根值）。

效率（efficiency） 电路输出功率与输入功率的比值，通常用百分比表示。

电气的（electrical） 与使用电压和电流以达到期望结果相关。

电气隔离（electrical isolation） 两个电路之间没有公共导电路径的一种状态。

触电（electrical shock） 电流通过人体而引起的身体感觉。

电磁场（electromagnetic field） 导体中电流在导体周围所产生的磁场。

电磁感应（electromagnetic induction） 导体与磁场或电磁场之间存在相对运动时，在导体中产生电压的现象或过程。

电磁现象（electromagnetism） 导体中电流产生磁场的现象。

电子（electron） 物质中电荷的基本粒子，电子带有负电荷。

电子的（electronic） 与自由电子在半导体或真空器件中的运动和控制相关。

元素（element） 构成宇宙的独特物质之一，每个元素都有特定的原子结构特征。

能量（energy） 做功的能力，单位为焦耳（J）。

工程记数法（engineering notation） 将任意数据表示为一位、两位或三位数与指数为3的倍数的10的乘方相乘的一种记数系统。

误差（error） 真值或最可接受值（实际值）与测量值之间的差。

励磁器（exciter） 为大型直流发电机或交流发电机的励磁线圈供电的独立的直流发电机。通常情况下，对励磁电流进行自动控制。

指数（exponent） 按某个基数增长的数值。

指数函数（exponential） 用自然对数（基）描述的数学函数，电容器的充电和放电可用指数函数描述。

F

下降沿（falling edge） 脉冲的负向转换。

下降时间（fall time，t_f） 脉冲从其幅度的90%下降到10%所需的时间。

法拉（farad，F） 电容量的单位。

法拉第定律（faraday's law） 一个表述线圈两端的感应电压等于线圈匝数乘以磁通量变化率的定律。

滤波器（filter） 一种让部分频率通过而阻止其他频率的电路。

自由电子（free electron） 从原子束缚中挣脱出来的价电子，能在材料原子结构中从一个原子自由移动到另一个原子。

频率（frequency，f） 周期函数变化速率的度量，对应于在1s内的周期数。频率的单位是赫兹。

频率响应（frequency response） 电路中特定频率范围内输出电压（或电流）的变化。

燃料电池（fuel cell） 一种将外部供给的电化学能量转换成直流电压的装置。氢燃料电池是最常见的类型。

函数发生器（function generator） 产生多种波形的仪器。

基频（fundamental frequency） 基频波形的重复率。

熔断器（fuse） 当电路中存在过大电流时熔断的保护装置。

G

增益（gain） 放大器输出与输入的比。

高斯（gauss） 磁通密度的CGS单位。

发电机或发生器（generator） 产生电信号的能源。

接地（ground） 电路中的公共点或参考点。

接地面（ground plane） 用做电路回路的参考点或天线系统中构成辐射结构的导电面。

H

半功率频率（half-power frequency） 滤波器输出功率为最大值的50%（输出电压为最大值的70.7%）的频率，又称为临界频率或截止频率。

半分法（half-splitting） 一种故障处理步骤，从电路或系统的中间开始，根据第一次测量，决定下一步是向输出端还是向输入端去查找故障。

霍尔效应（Hall effect） 当导体或半导体中电流垂直于磁场时电流密度发生的变化，电流密度的变化产生一个小的横向电压称为霍尔电压。

谐波（harmonics） 包含在复合波形中的频率，是脉冲重复频率（基频）的整数倍。

亨利（henry，H） 电感的单位。

赫兹（hertz，Hz） 频率的单位，一赫兹等于每秒一个周期。

高通电路（high-pass circuit） 某种高频能够通过而低频被抑制的电路。

横向组织（horizontal organization） 一种分散的业务结构，使管理人员专注特长并简化决策。

斜边（hypotenuse） 直角三角形中最长的边。

磁滞（hysteresis） 磁性材料的一种特性，材料磁化的变化滞后于所施加的磁场强度。

I

阻抗（Z）（impedance） 对正弦电流的总阻碍，用欧姆表示。

阻抗匹配（impedance matching） 用来匹配负载电阻与电源电阻以达到最大功率传输的一种技术。

感应电流（induced current，i_{ind}） 变化的磁场在导体中感应出的电流。

感应电压（induced voltage，v_{ind}） 变化的磁场产生的电压。

电感（L）（inductance） 电感器的一种特性，电感阻碍电流的变化的能力。

感应电动机（induction motor） 通过变压器作用在转子上实现励磁的交流电动机。

电感电抗（inductive reactance，X_L） 电感对正弦电流的阻碍，单位为欧姆。

电感电纳（inductive susceptance，B_L） 电感电抗的倒数，单位为西门子。

电感器（inductor） 一种无源元件，由线圈构成，具有电感特性。

输入（input） 施加于电路并得到期望的结果的电压、电流或功率。

瞬时功率（instantaneous power） 任意给定瞬间电路的功率值。

瞬时值（instantaneous value） 在给定瞬间波形的电压或电流值。

绝缘体（insulator） 在常规条件下不允许电流通过的材料。

集成电路（integrated circuit） 由电阻、晶体管和其他元件组成并制造在一个单元上的复杂有源电路，能够完成多种离散元件的功能。

积分器（integrator） 一种输出接近输入数学积分的电路。

接口（interface） 使一种电路的输出适应于另一种电路的输入，使之能共同正常兼容工作。

离子（ion） 带有净电荷的原子或原子组。

J

焦耳（Joule，J） SI制能量单位。

K

千瓦时（kilowatt-hour，kWh） 主要由电力公司采用的大能量单位。

基尔霍夫电流定律（Kirchhoff's current law） 一个表述流入节点总电流等于流出节点总电流的定律。可以等价地表达为流入流出节点的所有电流的代数和为零。

基尔霍夫电压定律（Kirchhoff's voltage law） 定律说明（1）围绕一个闭合路径的电压降总和等于在该闭

合路径中的电源电压，或（2）围绕一个闭合路径的所有电压代数和为零。

L

梯形图（ladder diagram） 类似阶梯的并联电路原理图，两个轨道表示施加电压的两个节点，任意数量的“梯级”是负载，构成梯子。

梯形逻辑（ladder logic） 一种用于对PLC编程的图形化计算机语言，编程就是通过在“梯档”上放置模拟继电器、接触器、开关、定时器和其他控制元件，使PLC能够控制工业过程。

滞后（lag） 即落后，描述波形的相位或时间关系，其中一个波形在相位或时间上落后于另一波形。

超前（lead） 即领先，描述波形的相位或时间的关系，其中一个波形在相位或时间上领先于另一波形。同样也是导线或电缆连接到设备或仪器的顺序。

前沿（leading edge） 脉冲的第一个阶跃或跳跃。

发光二极管（light-emitting diode，LED） 一种流过正向电流时发光的二极管。

楞次定律（Lenz's law） 一个物理定律，说明当通过线圈的电流变化时，由变化的磁场产生的感应电压极性总是阻碍电流的变化，电流不能瞬间改变。

线性（linear） 具有直线特性的关系。

磁力线（lines of force） 磁场中从北极指向南极的磁通线。

负载（load） 跨接在电路输出端的元件（电阻器或其他部件），从电源汲取电流并在其中作功。

压力传感器（load cell） 一种使用应变计将机械力转换成电信号的传感器。

负载电流（load current） 电路施加给负载的输出电流。

加载（loading） 连接在电路输出端的元件从电路吸取电流所产生的影响。

低通电路（low-pass circuit） 某种低频能够通过而高频被抑制的电路。

M

磁耦合（magnetic coupling） 两个线圈之间的磁连接，结果是一个线圈的变化磁力线穿过第二线圈。

磁场（magnetic field） 从磁铁的北极指向南极的力场。

磁场强度（magnetic field density） 磁性材料单位长度的磁动势，单位是安培-匝/米（At/m），也称为磁化力。

磁通（magnetic flux） 永久磁铁或电磁铁南北两极之间的磁力线数。

磁通密度（magnetic fluxdtensity） 垂直于磁场单位面积的磁力线数。

磁动势（magnetomotive force，mmf） 磁场的源，以安培-匝度量。

量值（magnitude） 物理量的值，如电压的伏特数或电流的安培数。

最大功率传输（maximum power transfer） 一种电路条件，当负载电阻等于电源内阻时，电源传输给负载最大功率。

最大功率传输定理（maximum power transfer theorem） 一个描述当负载电阻等于电源内阻时电源传输给负载最大功率的定理。

机电一体化（mechatronics） 机械和电子的协同组合，包括仪表和控制系统。

公制前缀（metric prefix） 在工程记数法中用来替换10的乘方的符号。

调制（modulate） 用含信息信号去改变另一信号特征的过程，如振幅、频率或脉冲宽度，从而使包含在第一个信号中的信息也被包含在第二个信号中。

万用表（multimeter） 一种测量电压、电流和电阻的仪表。

互感（L_M）（mutual inductance） 两个分离线圈之间的电感，如变压器。

N

负离子（negative ion） 带有净负电荷的原子或原子团。

中子（neutron） 不带电荷的原子粒子。

节点（node） 电路中有两个或两个以上元件相连接的点。

原子核（nucleus） 包含质子和中子的原子核心部分。

O

欧姆（ohm，Ω） 电阻的单位。

欧姆表（ohmmeter） 测量电阻的仪器。

欧姆定律（Ohm's law） 电流、电压与电阻之间关系的定律，电流与电压成正比，与电阻成反比。
开路（open） 电流通路被切断的电路条件。
开路（open circuit） 一种不含有完整电流通路的电路。
轨道（orbit） 电子环绕原子核作圆周运动的路径。
示波器（oscilloscope） 一种在屏幕上显示信号波形的测量仪器。
振荡器（oscillator） 一种仅有直流电源电压输入而在输出端产生周期性波形的电子电路。
输出（output） 系统对输入信号处理后所得的结果。

P

并联（parallel） 两个电路元件都接在电路中同一对节点之间的连接关系。
并联谐振（parallel resonance） 并联 *RLC* 电路中，阻抗最大且电抗相等的状态。
通带（passband） 能从滤波器通过的频率范围。
无源元件（passive component） 无需电源的元件，无源元件不能增加信号功率。
峰峰值（peak-to-peak value） 电压或电流波形上从最小点到最大点的测量值。
峰值（peak value） 电压或电流波形上正的最大值或负的最大值。
周期（period，T） 周期性波形一个完整周期的时间间隔。
周期性（periodic） 以固定时间间隔重复的特征。
磁导率（permeability） 材料中建立磁场难易程度的度量。
相位（phase） 随时间变化的波形相对于参考的相对移位。
相位角（phase angle） 在有抗电路中电源电压与总电流之间的角度。
相量（phasor） 借助幅度和相位角表示正弦波的一种表示方法。
光电导单元（photoconductive cell） 一种光敏的可调电阻器。
光电二极管（photodiode） 反向电阻随入射光变化的二极管。
光子（photon） 电磁能量的离散束。在真空中光子以光速运动，没有静止质量。
光伏效应（photovoltaic effect） 光能直接转换成电能的过程。
压电效应（piezoelectric effect） 变化的机械应力在晶体两端产生电压的性质。
极点（pole） 在实践中，滤波器或放大器中单个 *RC* 电路将导致响应在高于或低于某个频率时每十倍频程 20 分贝的变化率。
正离子（positive ion） 带有正净电荷的原子或原子团。
电位器（potentiometer） 三端可调电阻器。
功率（power） 能量使用的速率，单位为瓦特（W）。
功率因数（power factor） 伏安与有功功率或瓦特之间的关系，伏安乘以功率因数等于有功功率。
十的乘方（power of ten） 用基 10 及其指数的数值表达方式，将数据提高一个 10 的幂次。
额定功率（power rating） 电阻器不被过多的热量积聚而损害的最大功率。
电源（power supply） 将市电的交流电压转换成直流电压的器件。
精度（precision） 一系列测量结果的重复性（或一致性）的度量。
一次绕组（primary winding） 变压器的输入绕组，也称为原边。
探头（probe） 一个用来将电压连接到示波器或其他仪器输入端的配件。
质子（proton） 带正电的原子粒子。
脉冲（pulse） 一种由两个幅度相等方向相反阶跃构成的电压或电流波形，两个阶跃之间有一段时间间隔。
脉冲重复频率（pulse repetition frequency） 重复脉冲波形的基波频率，表示脉冲重复率，以赫兹或每秒脉冲数表达。
脉冲宽度（pulse width，t_W） 理想脉冲两个反向阶跃之间的时间间隔，对于非理想脉冲则为前后沿 50% 点之间的时间间隔。

Q

品质因数（quality factor，Q） 无功功率与有功功率的比值。

R

弧度（radian） 角度的度量单位，一个完整圆周为 2π 弧度，一弧度等于 57.3°。

辐射图像（radiometric image） 用颜色表示温度的热图。

斜坡（ramp） 一种具有随时间线性增大或减小特征的电压或电流波形。

***RC* 滞后电路（*RC* lag circuit）** 一种移相电路，其中取自电容两端的输出电压滞后于输入电压一个特定角度。

***RC* 超前电路（*RC* lead circuit）** 一种移相电路，其中取自电阻两端的输出电压超前于输入电压一个特定角度。

***RC* 时间常数（*RC* time constant）** 由 R 和 C 数值设定的决定 RC 串联电路时间响应的固定时间间隔，等于电阻和电容的乘积。

无功功率（reactive power，P_r） 电容器交替存储和返还电源能量的速率，单位是乏（VAR）。

参考接地（reference ground） 房屋结构的金属底座或印制电路板上的导电面积作为电压参考点，又称为公共端（com）。

反映负载（reflected load） 看起来呈现在变压器一次电源的负载。

反映电阻（reflected resistance） 二次电路反映到一边电路的电阻。

稳压电源（regulated power supply） 一种输出自动调节保持恒定值的电源。

继电器（relay） 一种电磁控制机械装置，其电触头由磁化电流断开或闭合。

磁阻（reluctance，R） 材料对磁场建立的阻碍能力。

电阻（resistance） 对电流的阻碍能力，单位为欧姆（Ω）。

电阻器（resistor） 专门设计的具有一定量电阻的电气元件。

分辨率（resolution） 仪器可以测量的物理量的最小增量。

谐振频率（resonant frequency） 在串联或并联 RLC 电路中发生谐振的频率。

保磁性（retentivity） 一旦磁化，撤除磁化力后材料保持磁化状态的能力。

变阻器（rheostat） 两端可调的电阻器。

直角三角形（right triangle） 含有一个 90°角的三角形。

纹波电压（ripple voltage） 由于滤波电容器充电和放电引起的电压小波动。

上升时间（t_r）（rise time） 脉冲从其幅度的 10%上升到 90%所需的时间。

上升沿（rising edge） 脉冲的正向转换。

***RL* 滞后电路（*RL* lag circuit）** 一种移相电路，取自电阻的输出电压滞后于输入电压一个特定角度。

***RL* 超前电路（*RL* lead circuit）** 一种移相电路，取自电感的输出电压超前于输入电压一个特定角度。

***RL* 时间常数（*RL* time constant）** 固定的时间间隔，由 L 和 R 确定，决定了电路的时间响应。

有效值（rms value，rms 值） 表明其热效应的正弦波的值，也称为有效值，等于峰值乘以 0.707。rms 代表方均根。

衰减（roll-off） 频率响应低于或高于临界频率时滤波器响应的减小。

转子（rotor） 直流发电机、交流发电机或电动机的转动部分。

S

舍入（round off） 在数据中对有效数字右边一位或多位数字进行截断处理的过程。

锯齿波（sawtooth waveform） 一种由斜坡组成电信号的波形；是三角波的一种特例，其中一个斜坡远短于另一个斜坡。

电路原理图（schematic） 电子或电气电路的符号化结构图。

科学记数法（scientific notation） 用 1～10 之间的一个数与 10 的乘方相乘来表示数据的方法。

二次绕组（secondary winding） 变压器的输出绕组。

选择性（selectivity） 谐振电路通过某些频率而抑制其他频率的有效性度量，带宽越窄选择性越好。

自激发电机（self-excited generator） 励磁绕组电流由自身输出提供的发电机。

半导体（semiconductor） 导电值介于导体和绝缘体之间的材料，硅和锗是半导体的两个例子。

灵敏度（sensitivity） 电压表的每伏特欧姆定额。

串联（series） 电路中的元件连接关系，其中元件在两点之间连接形成一个单一的电流通路。

顺向串联（series-aiding） 两个或多个电压源以相同的极性方向串联连接。

反向串联（series-opposing） 两个电压源以相反的极性方向串联连接。
串联谐振（series resonance） 串联 RLC 电路中，阻抗最小且电抗相等的状态。
层（shell） 电子围绕原子核运动轨道的能带。
短路（short） 两点之间路径电阻值为零或异常低的电路条件，通常为异常状况。
国际实用单位制（SI） 用于所有工程和科学研究的国际标准单位系统，是法文 Le Systeme International d'Unites 的缩写
西门子（siemens，S） 电导的单位。
有效数字（significant digit） 数据中已知是正确的数字。
正弦波（sine wave） 一种基于数学中正弦函数的电信号波形。
转差（slip） 感应电动机定子磁场的同步转速与转子转速之间的差。
电磁线圈（solenoid） 一种电磁控制装置，由磁化电流激活轴或柱塞的机械运动。
电磁阀（solenoid valve） 一种电气控制的空气、水、蒸汽、油、制冷剂以及其他流体的阀。
电源（source） 一种产生能量的器件。
扬声器（speaker） 一种将电信号转换为声波的电磁器件。
鼠笼（squirrel cage） 感应电动机转子内的铝框，用做形成旋转电流的电导体。
定子（stator） 直流发电机、交流发电机或电动机的固定部分。
稳态（steady state） 经过初始的瞬态时间以后电路出现的平衡状态。
降压变压器（step-down transformer） 二次电压低于一次电压的变压器。
升压变压器（step-up transformer） 二次电压高于一次电压的变压器。
刚性分压器（stiff voltage divider） 负载电阻比分压器电阻大得多的分压器，所以空载和有载输出电压几乎相同。
阻带（stopband） 被滤波器抑制的频率范围。
应变计（strain gauge） 由电阻性材料构成的可调电阻器，其中，由于应力的拉伸或压缩产生成比例的电阻变化。
叠加（superposition） 一种用于分析两个及两个以上电源电路的方法，分别研究每个电源单独的效应，然后组合这些效应。
开关（switch） 用于接通或断开电流通路的电子或电气元件。
同步电动机（synchronous motor） 一种其转子以和定子旋转磁场同样的转速运转的交流电动机。
系统（system） 完成特定功能的相互关联部件的组合。

T

振荡电路（tank circuit） 并联谐振电路。
锥形（tapered） 非线性，例如锥形电位器。
温度系数（temperature coefficient） 对于给定的温度变化指定物理量变化量的常数。
端子（terminal） 电路或电子器件对外的连接点。
端子等效（terminal equivalency） 两个电路接任意的相同负载电阻时产生相同的负载电压和负载电流的一种电路条件。
特斯拉（tesla，T） 磁通密度的 SI 单位。
热敏电阻（thermistor） 一种电阻值取决于温度的可调电阻器。
热电偶（thermocouple） 一种温度传感器，由两种不同的材料接合构成，产生的电压与温度成比例。
戴维南定理（Thevenin's theorem） 一个简化电路的定理，任意二端电阻电路可简化为单个等效电压源与等效电阻的串联。
时间常数（time constant） 由 R 和 C 或 R 和 L 数值设定的固定时间间隔，决定了电路的时间响应。
容差（tolerance） 元件值的变化限制。
后沿（trailing edge） 脉冲的第二个跃变或转换。
传感器（transducer） 将能量从一种形式转换到另一种形式的器件。
传输曲线（transfer curve） 输出与输入比例关系的图形表示。

变压器（transformer） 一种由两个或多个相互电磁耦合的线圈（绕组）构成的电气设备，一个绕组到另一个绕组存在互感。

瞬态（transient） 电路的暂时过渡状态，电路条件的突然或临时改变。

瞬态时间（transient time） 约等于五倍时间常数的时间间隔。

三角波（triangular waveform） 由两个斜坡构成的电气波形。

三角振荡器（triangular-wave oscillator） 一种产生三角波的电子振荡器，由带有两个跳变点的比较器和积分器构成。

触发（trigger） 某些电子设备或仪器的启动机制。

微调电容（trimmer） 小的可调电容器。

故障排除（troubleshooting） 对电路或系统的故障隔离、识别和纠正的系统过程。要把逻辑思维同系统的电路知识或系统操作联系起来去寻找并纠正电路故障。

有功功率（true power，P_{true}） 电路中消耗的功率，通常转化为热。

匝数比（turns ratio，n） 二次绕组匝数与一次绕组匝数之比。

U

不平衡电桥（unbalanced bridge） 不平衡状态的电桥电路，电桥两端的电压大小与电桥偏离平衡状态的量成比例。

V

原子价（valence） 指原子的外电子层或轨道。

价电子（valence electron） 处于原子最外层的电子。

乏（volt-ampere reactive，var） 无功功率的单位。

纵向组织（vertical organization） 一种自上而下的集中的业务结构，目前趋势是走向专业化。

伏特（volt，V） 电压或电动势的单位。

电压（voltage） 将电子从电路中的一点移动到另一点单位电荷所具有的能量。

分压器（voltage divider） 由串联电阻器构成的电路，在其两端得到一个或多个输出电压。

电压降（voltage drop） 由于能量损失而导致的电阻器两端的电压减小。

电压跟随器（voltage-follower） 增益为1的闭环同相运算放大器。

电压增益（voltage gain） 输出电压与输入电压的比值。

稳压（voltage regulation） 输入电压或负载变化时保持输出电压基本恒定的过程。

电压源（voltage source） 给任意负载提供恒定电压的器件。

电压表（voltmeter） 测量电压的仪器。

W

瓦特（watt，W） 功率的单位，1W表示在1s时间内使用了1J能量的功率。

瓦特定律（Watt's law） 说明功率与电流、电压和电阻关系的定律。

波形（waveform） 表明电压或电流如何随时间变化的模式。

韦伯（Wb）（weber） 磁通的SI单位，表示10^8条磁力线。

惠斯通电桥（wheatstone bridge） 一种四臂电桥，利用它的平衡状态可以精确测量未知电阻，使用它不平衡状态可以测量电阻的偏差。

线圈（winding） 电感中的导线圈或环路。

线圈电阻（winding resistance） 构成线圈的导线长度的电阻。

滑臂（wiper） 电位器的滑动触点。